



Métrologie sensorielle dans le cadre du contrôle qualité visuel

Anne Sophie Guerra

► To cite this version:

Anne Sophie Guerra. Métrologie sensorielle dans le cadre du contrôle qualité visuel. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Savoie, 2008. Français. NNT : . tel-00362743

HAL Id: tel-00362743

<https://theses.hal.science/tel-00362743>

Submitted on 19 Feb 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE

Présentée par

Anne-Sophie GUERRA

Pour obtenir le diplôme de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE SAVOIE
(Arrêté ministériel du 30 mars 1992)

Spécialité : Génie industriel

Métrologie sensorielle dans le cadre du contrôle qualité visuel

Soutenance publique le 21 octobre 2008 devant le jury composé de :

Zohra Cherfi	Rapporteur	Professeur, UTC
Catherine Dacremont	Rapporteur	Professeur, Ensbana
Bernard Yannou	Président	Professeur, ECP
Alexandre Vandini	Examineur	Directeur de Production, Patek Philippe SA
Maurice Pillet	Directeur de Thèse	Professeur, l'Université de Savoie
Jean Luc Maire	Co encadrant	MdC, l'Université de Savoie



Préparée au sein de SYMME
SYstèmes et Matériaux pour la MEcatronique
En convention avec Patek Philippe SA



Remerciements

Je souhaiterais adresser mes remerciements aux personnes qui m'ont fait l'honneur de participer à mon jury, Mesdames Zorha Cherfi, professeur de l'Université Technologique de Compiègne et Catherine Dacremont, professeur de l'Université de Bourgogne, en qualité de rapporteurs et Monsieur Yannou Bernard, Professeur à l'Ecole Centrale Paris, en tant qu'examinateur.

Merci à mon directeur de thèse, Monsieur Maurice Pillet et mon co-encadrant de thèse Monsieur Jean-Luc Maire, pour cette collaboration de trois ans.

Mes remerciements également à mon encadrant industriel, Monsieur Alexandre Vandini, directeur production de Patek Philippe SA, pour son soutien, son engagement pour le projet et ses précieux conseils.

Merci à toutes les personnes de Patek Philippe avec lesquelles j'ai partagé, durant ces trois ans, des moments agréables et qui ont été là pour me soutenir, m'encourager et me motiver lors de certains moments difficiles.

Merci à mon « couloir » où chaque jeudi et vendredi, c'était un peu moyen calme ... Merci plus particulièrement à Afaf, Dimitri et Pierro pour ces heures de nounou imprévues. Pierro, encore désolée pour ton sac ! Dimitri, c'est pas un chat ! Afaf, je te souhaite de connaître ce bonheur rapidement.

Merci à ceux, Fred et Elsa, Valérie, Claire et Jérôme, Lionel, Selma, Dame et Monsieur Gaspard, David et Karine, qui au fil de ces trois années, sont devenus des amis chers.

Merci à ceux qui ont toujours été mes amis, Vanessa et Michael, Audrey et Médi, Florence et Sylvain, Laurence et Lucien ... qui ont fait et qui font encore preuve de compréhension lorsque les nouvelles se font plus rares ou lorsque des dates ont été oubliées.

Et enfin, des millions de merci à mes proches. A ma maman qui m'a toujours encouragé et qui a toujours été là dans tous ces moments de la vie de bonheur ou d'épreuve. On ne choisit pas ses parents mais pour moi le hasard a bien fait les choses. Je suis tellement fière d'avoir une maman comme toi !

A mon frère, Manue et ses deux petites princesses, Romane et Zoé. Mes petits rayons de soleil !

A l'homme de ma vie qui m'a accompagné et soutenu lors de ces moments de doute et de découragement.

A Maxime, la plus belle chose qui me soit arrivée ! On ne le dit jamais suffisamment à mon goût ou bien souvent trop tard : Je t'aime.

*A ma maman,
pour son soutien et son amour*

Tables des Matières

TABLES DES MATIERES.....	9
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	15
TABLES DES FIGURES	15
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	17
TABLES DES TABLEAUX	17
INTRODUCTION GENERALE	19
CONTEXTE GENERAL ET PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE	19
1 CONTEXTE GENERAL.....	19
2 D'UN BESOIN OPERATIONNEL A UNE PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE.....	21
2.1 LES FONDEMENTS DE PATEK PHILIPPE SA	21
2.2 LE PROBLEME DE PATEK PHILIPPE : UN PROBLEME GENERIQUE ET NOVATEUR.....	22
3 LA DEMARCHE DE RECHERCHE CHOISIE ET PLAN DU MEMOIRE	23
CHAPITRE 1	27
LA SUBJECTIVITE DANS LE CONTROLE QUALITE	27
1 INTRODUCTION.....	27
2 LA QUALITE SUBJECTIVE.....	29
2.1 LA QUALITE PERÇUE	29
2.2 LA QUALITE ATTENDUE	29
2.3 LA SATISFACTION CLIENT.....	29
2.3.1 <i>Les différents écarts</i>	29
2.3.2 <i>Correspondance entre niveau d'offre et niveau de qualité perçue.....</i>	31
2.4 LA REPONSE DES ENTREPRISES	31
3 UN CONTROLE POUR LE NON MESURABLE.....	33
3.1 LES TYPES DE CONTROLE QUALITE.....	34
3.2 LES CONTROLES REpondant A LA QUALITE SUBJECTIVE	34
3.2.1 <i>Des mesures subjectives basées sur le ressenti du sujet.....</i>	34
3.2.2 <i>Les influences des éléments extérieurs sur l'examen visuel.....</i>	35
3.2.3 <i>Des mesures de plus en plus objectives.....</i>	37

4	L'EVALUATION SUBJECTIVE.....	38
4.1	QUELQUES CONCEPTS	38
4.1.1	<i>Perception et Sensation.....</i>	38
4.1.2	<i>La perception n'est pas seulement réception.....</i>	40
4.1.3	<i>Traitement de l'information</i>	40
4.1.4	<i>Les méthodes de l'évaluation subjective</i>	41
4.2	L'ANALYSE SENSORIELLE.....	42
4.2.1	<i>Les principes de base</i>	42
4.2.2	<i>Les épreuves analytiques.....</i>	47
4.2.3	<i>Les épreuves hédoniques.....</i>	47
4.3	METROLOGIE SENSORIELLE.....	49
4.3.1	<i>Définition de la métrologie</i>	49
4.3.2	<i>Définition de la métrologie sensorielle</i>	49
4.3.3	<i>Les domaines d'application de la métrologie sensorielle</i>	50
5	CONCLUSION.....	52
CHAPITRE 2		
REDUIRE LA VARIABILITE DE L'EVALUATION HUMAINE PAR L'ANALYSE SENSORIELLE.....		53
1	INTRODUCTION.....	53
2	ELABORATION DE LA DEMARCHE	55
2.1.1	<i>Le PDCA</i>	55
2.1.2	<i>L'analogie a notre démarche</i>	55
2.1.3	<i>Notre proposition</i>	56
2.2	PHASE 1 : LA PREPARATION DE LA DEMARCHE.....	59
2.3	PHASE 2 : LA CONSTRUCTION DE LA DEMARCHE	59
2.3.1	<i>Etape 1 : Constitution d'un groupe d'analyse sensorielle et identification d'un échantillon de produits</i>	60
2.3.2	<i>Etape 2 : Premiers descripteurs définis</i>	60
2.3.3	<i>Etape 5 : Définition des spécifications.....</i>	62
2.3.4	<i>Etape 3 : Réduction des descripteurs</i>	62
2.3.5	<i>Etape 4 : Établissement d'une liste de descripteurs limités</i>	73
2.4	PHASE 3 : LA VALIDATION DE LA DEMARCHE.....	80
2.4.1	<i>Etape 6 : Phase d'entrainement</i>	80
2.4.2	<i>Etape 7 : Test de répétabilité et test de reproductibilité</i>	80
3	LE CONTROLE VISUEL : DEUX EXPERTISES.....	85
3.1	LE PROCESSUS DU CONTROLE VISUEL.....	85
3.2	LA PERCEPTION DANS LE CONTROLE VISUEL	86
3.2.1	<i>La difficulté de bien percevoir</i>	86
3.2.2	<i>Les facteurs influents sur la perception.....</i>	90
3.2.3	<i>Améliorer la perception lors d'un contrôle visuel.....</i>	93
3.3	L'EVALUATION DANS LE CONTROLE VISUEL.....	93
3.3.1	<i>La difficulté de bien évaluer.....</i>	93
3.3.2	<i>Les facteurs influents sur l'évaluation</i>	95
3.3.3	<i>Améliorer l'évaluation lors d'un contrôle visuel</i>	95
4	CONCLUSION.....	96
CHAPITRE 3		
VERS UNE METROLOGIE DE L'ANALYSE SENSORIELLE. . .		97
1	INTRODUCTION.....	97
2	MESURE DE LA PERFORMANCE DE L'INSTRUMENT DE MESURE.....	99
2.1	LE TEST R&R : PRINCIPES ET LIMITES	99
2.1.1	<i>Principes d'un test R&R.....</i>	99

2.1.2	Limites d'un test R&R	105
2.2	LE TEST R ² &E ² (REPETABILITE ET REPRODUCTIBILITE & EXPLORATION ET EVALUATION).....	106
2.2.1	Les données d'un test R ² &E ²	107
2.2.2	Analyse des données d'un test R ² &E ²	111
3	UNE ORGANISATION METROLOGIQUE.....	123
3.1	UNE ORGANISATION POUR MAITRISER LA VARIABILITE	123
3.2	UN REFERENTIEL POUR PERCEVOIR LA VARIABILITE	124
3.3	LA NOTION DE METROLOGIE.....	124
3.3.1	Quelques définitions.....	124
3.3.2	La métrologie dimensionnelle.....	125
3.4	LES BONNES PRATIQUES EN METROLOGIE DIMENSIONNELLE	126
3.4.1	Le système de cotation.....	126
3.4.2	Les instruments de mesure	126
3.4.3	L'organisation métrologique.....	127
3.4.4	Capabilité du moyen de mesure	128
3.5	L'ANALOGIE METROLOGIE DIMENSIONNELLE – METROLOGIE SENSORIELLE	128
3.6	PROPOSITION D'UNE METROLOGIE SENSORIELLE.....	130
3.6.1	Le système de cotation.....	130
3.6.2	Les instruments de mesure	130
3.6.3	L'organisation métrologique.....	131
3.6.4	La capacité du moyen de mesure	132
4	CONCLUSION.....	136
CHAPITRE 4	137
	EVALUATION D'UN PRODUIT COMPLEXE SUR LA BASE DE LA PERCEPTION SENSORIELLE.....	137
1	INTRODUCTION.....	137
2	QUANTIFIER PAR UNE MESURE LA PERCEPTION GLOBALE D'UNE SURFACE OU D'UN PRODUIT	139
2.1	ARBORESCENCE DES ELEMENTS D'APPRECIATION D'UN PRODUIT LORS D'UN EXAMEN VISUEL	139
2.2	EVALUATION D'UNE SURFACE PRESENTANT UNE ANOMALIE DECRIE A L'AIDE D'UN SEUL DESCRIPTEUR 141	
2.2.1	Hypothèse.....	141
2.2.2	Fonction perte	143
2.3	EVALUATION D'UNE COMBINAISON DE PLUSIEURS ANOMALIES SUR UNE SURFACE	145
2.3.1	Combinaison Quadratique : pour un descripteur sur une surface.....	145
2.3.2	Combinaison quadratique : pour plusieurs descripteurs sur une surface.....	148
2.4	EVALUATION D'UNE COMBINAISON DE PLUSIEURS ANOMALIES SUR PLUSIEURS SURFACES	150
2.5	RECAPITULATIF DES DIFFERENTES COMBINAISONS D'ANOMALIE	152
3	CONCLUSION.....	154
CHAPITRE 5	155
	APPLICATION CHEZ PATEK PHILIPPE SA	155
1	INTRODUCTION.....	155
2	LES ENJEUX DE L'APPLICATION D'UNE NOUVELLE APPROCHE DANS LE CONTROLE VISUEL.....	157
2.1	LES DIFFICULTES RELEVÉES DANS L'ENTREPRISE	157
2.1.1	Les notions utilisées	157
2.1.2	Les résultats des premiers audits	158
2.2	LES CONSEQUENCES	160
3	LA CREATION D'UN STANDARD POUR LE CONTROLE VISUEL.....	162
3.1	LA DEMARCHE RETENUE	162

3.1.1	Un projet pilote	162
3.1.2	La structuration du projet	163
3.2	LES ETAPES SUIVIES	163
3.2.1	Première étape : L'Exploration et ses apports.....	164
3.2.2	Deuxième étape : L'Evaluation, utilisation et apports de la démarche	165
4	LA REALISATION D'UN OUTIL D'AIDE A LA DECISION.....	168
4.1	LES DIFFICULTES DE MISE EN PLACE DE LA DEMARCHE	168
4.2	UNE SOLUTION : UNE INTERFACE DE SAISIE.....	168
5	LA MISE EN PLACE D'UNE STRUCTURE METROLOGIQUE CHEZ PATEK PHILIPPE	173
5.1	DU CONCEPT A L'APPLICATION.....	173
5.2	LE CHEMIN QU'IL RESTE A PARCOURIR.....	174
6	LES RESULTATS OBTENUS.....	176
6.1	CE QUE L'ON SAIT MESURER	176
6.2	CE QUE L'ON NE SAIT PAS MESURER	178
6.3	UNE NOUVELLE VISION DES CHOSES.....	179
7	CONCLUSION.....	181
	CONCLUSION GENERALE	183
	BILAN ET PERSPECTIVES	183
1	BILAN GLOBAL DE LA THESE.....	183
2	LES PERSPECTIVES DE LA RECHERCHE.....	185
2.1	SUR LA DEMARCHE APPLIQUEE.....	185
2.2	SUR LA DEMARCHE GENERIQUE.....	186
	BIBLIOGRAPHIE.....	189
	LISTE DES REFERENCES	189
	ANNEXES	197
	ANNEXE 1.....	199
	PRESENTATION DE L'ENTREPRISE PATEK PHILIPPE SA	199
1	QUELQUES DATES... ..	199
2	LES PRODUITS PATEK PHILIPPE	200
2.1	LES MONTRES.....	200
2.2	LES COMPOSANTS.....	201
2.3	UNE DIVERSITE IMPORTANTE	201
3	UNE IMAGE DE MARQUE A DEFENDRE	201
	ANNEXE 2.....	203
	LES DIFFERENTES EPREUVES DE L'ANALYSE SENSORIELLE.....	203
1	EPREUVES DISCRIMINATIVES.....	204
2	EPREUVES DESCRIPTIVES.....	205
3	EPREUVES HEDONIQUES.....	209
	ANNEXE 3.....	211
	OUTILS STATISTIQUES DE L'ANALYSE SENSORIELLE.....	211
1	LES STATISTIQUES DESCRIPTIVES.....	211

1.1	LES METHODES FACTORIELLES	211
1.1.1	<i>L'analyse en Composantes Principales (ACP)</i>	211
1.1.2	<i>L'Analyse factorielle des correspondances (AFC)</i>	213
1.1.3	<i>L'Analyse factorielle discriminante (AFD)</i>	214
1.2	LA CLASSIFICATION AUTOMATIQUE (CA)	214
2	LES STATISTIQUES INFERENTIELLES	215
2.1	LES INTERVALLES DE CONFIANCES (IT).....	215
2.2	LES TESTS D'HYPOTHESE.....	216
2.3	L'ANALYSE DE LA VARIANCE	217

Table des Illustrations

Tables des Figures

Figure 1 : Etapes de la démarche suivie	23
Figure 2 : Qualité perçue et satisfaction du client, un écart de perception [Giordano, 2006].	30
Figure 3 : Modèle 'gaps' [Parasuraman et al., 1985].....	30
Figure 4 : A chaque niveau de prix, sa qualité perçue [Giordano, 2006]	31
Figure 5 : Répartition problèmes-coûts	32
Figure 6 : Flux de la décision finale d'un Contrôle Qualité [adapté Wikipédia]	33
Figure 7 : Processus de la mesure subjective.....	34
Figure 8 : Processus de perception : Recueil et de traitement de l'information sensorielle ...	39
Figure 9 : Contrôle visuel : les étapes de transmission de l'information.....	41
Figure 10 : L'évaluation subjective et ses domaines connexes [CRIN, 1997].....	41
Figure 11 : Les différents types de sujets [ISO 8586-2, 1994]	43
Figure 12 : Locaux du service Evaluation sensorielle du [CTSCCV]	44
Figure 13 : Exemples d'échelles en évaluation sensorielle - extrait de [SSHA, 1998]	45
Figure 14 : Les macro étapes de l'analyse sensorielle	46
Figure 15 : Choix du type d'épreuves.....	46
Figure 16 : Choix du type d'épreuves analytiques [SSHA, 1998].....	47
Figure 17 : Les étapes standards d'une analyse sensorielle	48
Figure 18 : Domaines d'application de la métrologie sensorielle	50
Figure 19 : Répartition des domaines d'application de l'évaluation sensorielle	51
Figure 20 : Le cycle PDCA	55
Figure 21 : Etapes de l'analyse sensorielle réalisée pour l'élaboration de la démarche.....	57
Figure 22 : Formulaire à remplir par chaque membre du groupe.....	61
Figure 23 : Construction de l'échelle d'intensité pour chaque descripteur	61
Figure 24 : Formulaire à remplir pour l'évaluation et le jugement des produits lors de la phase 2	62
Figure 25 : Résultat de la première analyse AFC – Axes 1 et 2	68
Figure 26 : Résultat de la première analyse AFC – Axes 1 et 3	69
Figure 27 : Résultat de la première analyse AFC – Axes 2 et 3	69
Figure 28 : Résultat de la première analyse AFC – Axes 3 et 4	70
Figure 29 : Résultat de l'analyse AFC avec la liste finale de descripteurs – Axes 1 et 2	72
Figure 30 : Résultat de l'analyse AFC avec la liste finale de descripteurs – Axes 1 et 3	72
Figure 31 : Schéma de principe sur la réflexion et réfraction de la lumière	75
Figure 32 : Les angles particuliers	76

Figure 33 : Schéma de l'effet lumière noire.....	76
Figure 34 : Schéma de la brillance.....	76
Figure 35 : Schéma de l'effet miroir	77
Figure 36 : Combinaisons possibles pour le descripteur Marque	79
Figure 37 : Le processus de contrôle visuel.....	86
Figure 38 : Photo présentée au groupe de personnes.....	87
Figure 39 : Seconde photo présentée.....	87
Figure 40 : Premier balayage du regard.....	88
Figure 41 : Balayage du regard après 10 secondes	88
Figure 42 : Exemple de deux perceptions différentes lors d'un contrôle visuel	89
Figure 43 : Exemple d'une anomalie non perçue lors d'un contrôle visuel	89
Figure 44 : Recensement des facteurs influents impactant la perception des anomalies.....	90
Figure 45 : Résultats de l'analyse de la variance.....	92
Figure 46 : Exemple d'une anomalie perçue et quantifiée identiquement mais jugée différemment.....	94
Figure 47 : Recensement des facteurs influents impactant l'évaluation des anomalies	95
Figure 48 : Variables utilisées dans l'expertise d'évaluation	117
Figure 49 : Fonction perte de Taguchi	118
Figure 50 : Une organisation pour maîtriser la variabilité.....	124
Figure 51 : Incertitude de mesure, les types d'erreurs	125
Figure 52 : Un exemple de cotation	126
Figure 53 : Métrologie dimensionnelle : étalonnage [Duret et al., 2005].....	127
Figure 54 : Analogie Métrologie Dimensionnelle- Métrologie Sensorielle	129
Figure 55 : Exemple de tolérancement sensoriel	130
Figure 56 : Architecture Métrologie Sensorielle	131
Figure 57 : Le niveau de transfert = un niveau pivot.....	135
Figure 58 : Arborescence de description sensorielle d'un produit.....	139
Figure 59 : Limites de tolérance en fonction du couple Descripteur/Surface	140
Figure 60 : 1 ^{ère} arborescence – Une anomalie sur un produit.....	141
Figure 61 : 2 ^{ème} arborescence – 2 anomalies associées à un même descripteur et présentes sur une même surface	145
Figure 62 : Combinaison quadratique des anomalies sur un même descripteur	146
Figure 63 : 3 ^{ème} arborescence – Plusieurs anomalies associés à différents descripteurs et présents sur une même surface.....	148
Figure 64 : Combinaison quadratique des anomalies sur plusieurs descripteurs	148
Figure 65 : 4 ^{ème} arborescence – Plusieurs anomalies associés à plusieurs descripteurs sur différentes surfaces.....	150
Figure 66 : Cycle de la réalisation des pièces.....	158
Figure 67 : Contrôle visuel : les étapes de transmission de l'information.....	160
Figure 68 : Exemple de définition de zones	162
Figure 69 : 3 étapes = 2 expertises différentes lors d'un contrôle + 1 décision	163
Figure 70 : Extrait de la procédure de contrôle pour les boîtes de montre.....	165
Figure 71 : Evaluation et Jugement de l'anomalie	166
Figure 72 : Graphique de l'analyse fonctionnelle	169
Figure 73 : Principe des saisies des anomalies dans l'interface	170
Figure 74 : Décision finale donnée par l'interface	171
Figure 75 : Exemples d'indicateurs de performance pouvant être donnés par l'interface....	172
Figure 76 : Architecture Métrologie Sensorielle dans notre cas d'application.....	173
Figure 77 : Extrait de l'indicateur des retours du secteur 3.....	177
Figure 78 : Une gamme riche en modèle et en complication.....	200
Figure 79 : Une référence de montre déclinée en plusieurs modèles suivant la couleur du cadran et du bracelet	200
Figure 80 : Un nombre de composants importants	201
Figure 81 : Schéma d'un dendrogramme.....	215

Table des Illustrations

Tables des Tableaux

Tableau 1 : Comparaison domaine subjectif – Répondant mesurable.....	37
Tableau 2 : Première liste des descripteurs	61
Tableau 3: Classement des descripteurs	64
Tableau 4 : Classement des produits.....	66
Tableau 5 : Liste de descripteurs après la troisième réduction	67
Tableau 6 : Table des valeurs propres de l'AFC	68
Tableau 7 : Pertinence des descripteurs.....	71
Tableau 8 : Les 4 descripteurs et leurs définitions	73
Tableau 9 : Les 4 descripteurs et leurs caractéristiques	73
Tableau 10 : Première colonne de la grille d'intensité.....	75
Tableau 11 : Décomposition de l'anomalie Marque	78
Tableau 12 : Extrait du test de répétabilité des experts	81
Tableau 13 : Test de reproductibilité des experts	83
Tableau 14 : Test de reproductibilité des sujets naïfs	84
Tableau 15 : Définitions des valeurs possibles pour les facteurs testés	91
Tableau 16 : Résultats des anomalies perçues par pièce sous certaines conditions (en %).92	
Tableau 17 : Essai de vérification du plan fractionnaire.....	93
Tableau 18 : Extrait de la table de refus.....	95
Tableau 19 : Valeurs de P'_a pour $a = 0$ et $a = 20$ suivant X_T	102
Tableau 20 : Degrés d'accord et valeurs de Kappa [Landis et al., 1977].....	103
Tableau 21 : Tableau de synthèse sur l'estimation de l'efficacité des évaluateurs.....	104
Tableau 22 : Acceptation d'un instrument de mesure selon son efficacité	104
Tableau 23 : Trame du document à remplir par le panel expert lors de leur contrôle.....	108
Tableau 24 : Synthétique des résultats du test $R^2 \& E^2$	109
Tableau 25 : Les données du test.....	110
Tableau 26 : Proportion de jugements sur une échelle de r catégories	111
Tableau 27 : Exemple d'analyse des données d'un test $R^2 \& E^2$: analyse globale	114
Tableau 28 : Exemple d'analyse des données d'un test $R^2 \& E^2$: analyse détaillée de l'exploration.....	116
Tableau 29 : Résultats de chaque sujet pour l'exploration.....	116
Tableau 30 : Exemple d'analyse des données d'un test $R^2 \& E^2$: analyse détaillée de l'évaluation	120

Tableau 31 : Résultats de chaque sujet pour l'évaluation	120
Tableau 32 : Récapitulatif des calculs effectués pour un test R^2 & E^2	123
Tableau 33 : Ordre de présentation des produits pour chaque sujet – Intensités 4 et 5	142
Tableau 34 : Ordre de présentation des produits pour chaque sujet – Intensités 1 et 2	143
Tableau 35 : Calcul de la fonction Perte	144
Tableau 36 : Regroupement du test triangulaire	146
Tableau 37 : Tableau d'évaluation d'une surface comportant plusieurs anomalies	149
Tableau 38 : Tableau d'évaluation d'une surface comportant une anomalie inacceptable ..	150
Tableau 39 : Tableau d'évaluation d'un produit comportant plusieurs surfaces	151
Tableau 40 : Tableau d'évaluation d'un produit comportant une surface inacceptable	151
Tableau 41 : Récapitulatif du tableau de calcul des différentes combinaisons de la perte ..	152
Tableau 42 : Bilan des anomalies sur le produit : Intensités/Anomalies/Descripteurs/Surfaces	152
Tableau 43 : Tableau de synthèse pour l'application de l'évaluation du produit	153
Tableau 44: Résultat du test R&R	159
Tableau 45 : Exemple d'une table des anomalies	161
Tableau 46 : Justification des choix du contrôleur en fonction des standards à utiliser	167

Introduction Générale

Contexte général et problématique de recherche

1 CONTEXTE GENERAL

Et si la perfection existait ?

Cette interrogation paraît complètement utopique, mais pourquoi ? Pourquoi ne pas y croire ? Pourquoi ne pas rêver ? Et si le rêve était réalité

En effet, ne pas y croire serait alors un constat d'échec et nous n'aimons pas l'échec !!!!

Et si, les plus grands chercheurs de l'histoire étaient partis de cet esprit défaitiste... nous ne verons pas dans ce monde qui nous permet tant de choses !

Bref, pouvons nous croire à *l'objet manufacturé parfait* ? Pourquoi pas ? Si l'évolution des produits industriels allait dans le sens du raffinement ...

Ce premier aspect que nous abordons dans notre contexte général peut paraître assez surprenant car inhabituel lorsque l'on parle de production industrielle. Mais si cette production émane d'une entreprise de prestige, cela semble tangible. Ce prestige, l'entreprise Patek Philippe s'attache à l'atteindre et à le conserver. Pour cette entreprise en effet, le simple luxe ne suffit pas et les produits doivent se distinguer des autres produits par un raffinement, une ligne et une complexité inégalables (présentation de l'entreprise Patek Philippe en Annexe 1)

Pour ce type d'entreprise, le principal enjeu est donc d'atteindre la perfection ! Et c'est là peut être une nouvelle évolution vis-à-vis de *l'objet manufacturé*. Cette perfection peut elle être atteinte ? Si oui, avec quelles contraintes ?

Pour le client d'un produit tels que ceux réalisés par Patek Philippe, il ne s'agit pas seulement d'acheter une montre ! Il s'agit, pour le client de faire l'acquisition d'un produit d'exception. Son besoin dépasse un besoin banalement fonctionnel, *lire l'heure*, pour atteindre celui d'acquérir un objet d'exception dont la qualité perçue traduit toute l'attention que l'entreprise a apporté à sa réalisation.

C'est donc dans ce contexte industriel que cette thèse a été réalisée. Le produit à délivrer doit, en plus d'être fonctionnel et techniquement irréprochable, être d'une qualité perçue exemplaire.

L'objectif de nos travaux n'a donc pas été d'améliorer la fonctionnalité et la technicité inégalée des produits de Patek Philippe. Il a été de comprendre, d'interpréter et de contrôler les critères de qualité permettant d'atteindre cette perfection si convoitée au niveau de la qualité perçue des produits.

Cet objectif marque aussi un tournant dans le domaine du contrôle qualité. Souvent axé sur le contrôle dimensionnel des produits avec la métrologie dimensionnelle, le contrôle qualité est également axé aujourd'hui sur le contrôle de l'aspect de ces produits.

Ce contrôle présente la particularité d'être tout à fait subjectif puisque c'est l'opérateur en charge du contrôle qui fait lui-même office d'instrument de mesure. Cette évaluation humaine n'est pas, nous le verrons, sans poser des difficultés pour délivrer des résultats de contrôle fiables.

L'homme comme instrument de mesure engendre en effet une variabilité dans les résultats de contrôle et cette variabilité doit être maîtrisée. *"On ne peut être juste si on n'est humain" (Vauven)*. L'opérateur ne peut donc pas être totalement impartial dans son contrôle, son sentiment personnel influençant inévitablement sa réponse.

Souvent citée mais peu traitée, la problématique de l'évaluation humaine est classiquement abordée dans le domaine de l'analyse de besoins clients ou celui de la comparaison de produits mais reste en revanche très rarement abordée dans le domaine du contrôle qualité. De nombreuses sociétés ont en effet développé et mis en place des méthodes d'évaluation, le plus souvent basées sur des outils et méthodes de l'analyse sensorielle pour des applications marketing ou de recherche et développement. Cependant, et c'est là que nos travaux se positionnent, cette problématique est très rarement évoquée dans un cadre destiné au contrôle qualité. Cette absence peut être expliquée par le fait que, dans la notion de contrôle, la mesure quantitative occupe un rôle prépondérant. *"Si vous pouvez mesurer ce dont vous parlez, et l'exprimer par un nombre, alors vous connaissez quelque chose de votre sujet. Si vous ne le pouvez, votre connaissance est d'une bien pauvre espèce et bien incertaine" (Lord Kelvin)*.

Les entreprises comme Patek Philippe, avec des contrôles qualité axés sur l'aspect des produits et donc par nature très subjectifs, expriment le besoin de disposer d'un cadre méthodologique pour disposer d'instruments de mesure répondant aux mêmes critères que ceux utilisés classiquement dans le domaine du contrôle mesurable. L'objectif de nos travaux a donc été d'apporter des réponses à ce besoin dans ce contexte de recherche encore peu exploré et en plein essor.

Nous proposons ainsi une démarche d'évaluation subjective utilisable dans le domaine du contrôle qualité et pouvant être transposée dans un contexte de production avec tout ce que cela suppose : respect des cadences de production, outils accessibles et compréhensibles à toutes les personnes concernées... L'objectif est ainsi de créer un cadre conceptuel et méthodologique solide pour traiter ce sujet aussi bien sur le plan scientifique que sur le plan pratique. Cet objectif inclut également celui de proposer, sur des bases scientifiques rigoureuses, des critères d'acceptabilité pertinents à la fois pour évaluer l'instrument de mesure et pour évaluer la qualité du produit. Nous parlons d'évaluation subjective maîtrisée grâce à son application dans la métrologie sensorielle que nous proposons. C'est d'ailleurs

une des attentes ayant motivé notre partenaire industriel à s'engager avec nous dans cette démarche de recherche.

Ce mémoire présente le contexte, le déroulement, les acquis et les résultats de nos travaux.

2 D'UN BESOIN OPERATIONNEL A UNE PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE

2.1 LES FONDEMENTS DE PATEK PHILIPPE SA

Philippe Stern, Président de Patek Philippe SA dans une lettre présente dans le catalogue proposant l'ensemble de la gamme de montres proposée aux clients, traduit parfaitement l'esprit, la tradition, les fondements de cette grande maison :

"Vous songez à acquérir une montre Patek Philippe. A ce titre, vous appartenez au cercle des admirateurs de l'excellence pour qui un garde-temps représente bien plus qu'un instrument qui donne l'heure. Acquérir une Patek Philippe, c'est devenir le dépositaire d'une tradition artistique et scientifique. C'est faire entrer dans le cercle familial un objet précieux qui, reflet vivant d'un savoir-faire ancestral, réclame de son propriétaire les qualités d'un authentique amateur d'art : discernement, appréciation mais aussi générosité. Car, et pour citer notre campagne de communication actuelle, « Jamais vous ne posséderez complètement une Patek Philippe. Vous en serez juste le gardien, pour les générations futures. »

La longévité de nos montres garantit à vos descendants le plaisir exclusif de porter le meilleur des garde-temps. Notre manufacture s'y est engagée dès sa fondation, voici plus de 160 ans, et n'a jamais cessé de poursuivre cette vocation. Inaugurant leurs ateliers genevois, Antoine Norbert de Patek, esthète raffiné, et Jean-Adrien Philippe, horloger de génie, s'étaient promis de réaliser les plus belles montres du monde. La sagacité du premier, associée à l'inventivité du second, ont permis de relever ce défi.

Prendre un tel engagement suppose une volonté constante de se surpasser. C'est pourquoi, virtuose incontestée de la complication, créatrice en 1989 de la montre la plus compliquée du monde, la manufacture Patek Philippe n'a de cesse de faire reculer les limites de l'art horloger. Ses innovations, inspirées par la poésie du temps et louées pour l'élégance de leur construction, répondent au désir de créer de nouvelles fonctions. La précision extrême des mouvements, l'excellence de l'exécution, la noblesse des matériaux et le raffinement des techniques décoratives contribuent à la définition du « style Patek Philippe ». Un style d'une distinction inimitable alliant complexité des mécanismes et sobriété des formes.

Le recrutement des talents les plus prometteurs et notre centre de formation interne nous permettent de perpétuer les métiers les plus rares. Stylistes et ingénieurs, maîtres horlogers et sertisseurs, comme tous les autres artisans de notre manufacture, sont invités à prendre leur temps. Pour Patek Philippe, cette recommandation garantit qu'aucun compromis de viendra ternir la perfection de ces produits

En choisissant de devenir l'heureux acquéreur d'une Patek Philippe, vous allez, vous aussi, faire le choix de l'authenticité. Nous ne pouvons espérer plus grand hommage à notre quête de la perfection. Créé dans le souci de refléter la qualité de nos créations, le présent catalogue se propose de vous aider à élire celle qui partagera les petits et les grands moments d'émotions de votre vie."

Philippe Stern
Président, Patek Philippe

Cette lettre souligne, l'ampleur de la tâche de l'entreprise Patek Philippe, celle de créer des produits atteignant la perfection tant au niveau de leur fonctionnalité, de leur technicité que de leur esthétisme.

Nous entendons par esthétisme, non pas le design de la pièce qui reste une marque de fabrique totalement propre à la société, mais plutôt le résultat de la perception et de l'évaluation des anomalies pouvant être présents sur le produit et générés lors de sa fabrication. Dans l'entreprise Patek Philippe, tout produit peut être considéré comme unique de part son mode d'obtention. L'ensemble des opérations allant du choix des matières premières utilisées à la montre elle-même résulte d'une réalisation artisanale. L'artisan est alors confronté à son propre jugement sur l'esthétisme du produit lorsqu'il détecte une anomalie sur le produit (le produit parfait n'existe évidemment pas, surtout lorsqu'il est réalisé de manière artisanale). La question essentielle est généralement de savoir si une anomalie, lorsqu'elle est détectée est acceptable ou non ?

Les montres Patek Philippe garantissent à leurs clients une fonctionnalité et une technicité irréprochables. Aujourd'hui, face au développement considérable de l'entreprise et l'objectif permanent d'atteindre la perfection pour ses produits, l'entreprise est aujourd'hui très sensible à la qualité esthétique de ses produits perçue par les clients. Cette qualité est évaluée par l'homme à partir de son expérience. Le travail réalisé dans ce projet a pour but d'établir une véritable métrologie des anomalies non mesurables visant à garantir les résultats de contrôle par rapport à un référentiel ainsi que visant à garantir une répétabilité et une reproductibilité dans ces contrôles.

La question que nous nous sommes posés a été de savoir s'il était possible de garantir pour les critères non mesurables une organisation métrologique similaire à ce que l'on sait faire dans le cas de mesures dimensionnelles.

2.2 LE PROBLEME DE PATEK PHILIPPE : UN PROBLEME GENERIQUE ET NOVATEUR

Outre cette notion d'exception dans la qualité souhaitée des produits, la difficulté rencontrée par Patek Philippe reste un problème, qui est pour certaines entreprises et qui va devenir dans quelques années, un problème majeur. Nous sommes dans une société où l'apparence est de plus en plus importante et où le désir d'acheter se provoque. Comme nous l'avons déjà un peu aperçu dans le paragraphe 1, l'achat par le client n'est plus seulement utile et le produit ne doit plus être seulement fonctionnel, l'achat est devenu « coup de cœur » et le produit doit être « beau ».

Aussi, Patek Philippe comme de plus en plus de société rencontre des problèmes d'objectivité dans le jugement du « beau » vis-à-vis de ses produits. Que veut dire « beau » ? Comment juger de ce qui est « beau » ? Ne dit-on pas que la beauté dépend aussi d'autre chose ? C'est un tout ? Aussi, lorsqu'il s'agit de porter un jugement, il va de soi que *"Ce que l'homme appelle vérité, c'est toujours sa vérité, c'est-à-dire l'aspect sous lequel les choses lui apparaissent"* (Protagoras – Sophiste grec).

Nous voyons donc que ce problème de jugement de valeur totalement basé sur des fondements subjectifs reste donc très abstrait. Cependant, dans un contexte de contrôle qualité à un niveau de production, ce jugement de valeur doit s'inscrire dans une démarche totalement maîtrisée et où chaque juge doit être entraîné à donner la même réponse sans faire intervenir leur jugement personnel. Il faut donc arriver à passer outre un jugement personnel sur la qualité du produit pour obtenir un jugement global d'entreprise.

De plus, ce jugement doit être alors utilisé par l'ensemble des personnes concernées, mais son utilisation doit être répétable et reproductible.

La démarche que nous proposons répond alors à ce souci qui s'inscrit dans un contexte totalement générique afin d'essayer de répondre à l'ensemble des entreprises rencontrant

3 LA DEMARCHE DE RECHERCHE CHOISIE ET PLAN DU MEMOIRE

Le diagramme illustre la méthodologie de la recherche en génie civil, structurée en cinq étapes principales, chacune associée à un chapitre de la thèse.

- Étape 1 : Analyse de l'existant** (Chapitre 1)
 - 1a : État des lieux dans la société : 1^{ère} mesure
 - 1b : Analyse de la littérature sur :
 - l'évaluation subjective
 - la qualité perçue
 - le contrôle visuel
- Étape 2 : Démarche : Contrôle d'une anomalie** (Chapitre 2)
 - 2a : Construction d'un modèle : Démarche générique
 - 2b : Application à un chantier pilote : produit + groupe de travail
- Étape 3 : Démarche : Métrologie** (Chapitre 3)
 - 3a : Construction d'un modèle : Démarche générique
 - 3b : Application à un chantier pilote : produit + groupe de travail
- Étape 4 : Démarche : Contrôle d'un produit** (Chapitre 4)
 - 4a : Construction d'un modèle : Démarche générique
 - 4b : Application à un chantier pilote : produit + groupe de travail
- Étape 5 : Application : Contrôle + Métrologie** (Chapitre 5)
 - Application du modèle à un chantier pilote

Les flèches indiquent la progression séquentielle de la méthodologie, de l'étape 1 à l'étape 5.

La première étape de notre démarche afin de répondre à la problématique de notre thèse a été de réaliser une analyse de l'existant. Notre but était alors de comprendre finement le contexte dans lequel notre travail de thèse se déroule. Nous avons alors réalisé des premières mesures afin de comprendre quelle était vraiment cette problématique. La première des remarques qui a alors été faite, fut que les résultats des contrôles sur l'aspect des pièces par l'évaluation de l'homme ont pour seuls résultats une acceptabilité ou non de la globalité de la pièce. En effet, lors de l'audit effectué, nous nous sommes aperçus que les

évaluateurs donnaient une réponse sur la globalité de la pièce comme étant *Conforme* ou *Non conforme* à ce qu'ils pensaient représenter la marque de la société en terme de qualité d'aspect. Aussi, il s'agissait alors d'un jugement de la pièce en sa globalité et non de l'ensemble des anomalies la constituant. De plus, chaque évaluateur se revendiquait connaissant les critères d'acceptabilité de la société mais chacun avait sa propre réponse (bien souvent différente), les critères n'étant pas véritablement définis.

Aussi, en parallèle de ces premiers tests, nous avons effectué des recherches sur les différentes propositions que pouvait nous apporter la littérature afin de répondre à notre problématique. Certes, même si ce domaine de contrôle qualité n'est que très rarement traité dans la littérature, nous avons voulu comprendre les différentes méthodes proposées comme par exemple en Analyse Sensorielle, pour pouvoir l'appliquer ou la transformer afin de l'enrichir et de répondre à notre contexte.

A noter, outre une réponse directe sur le produit sans justification et des critères d'acceptabilité non définis afin de répondre à la satisfaction client, les variabilités des décisions obtenues lors de ces tests qui représentent en réalité typiquement les réponses données lors des contrôles en production, créent un coût et un retard non négligeable pour la société.

Il faut aussi préciser l'un des autres constats relevés lors de ces premiers tests au sujet de la perception de l'anomalie. En effet, les résultats entre évaluateurs peuvent être différents suite à la non perception ou à la mauvaise perception de l'anomalie. Ce constat fait alors parti d'une notion fondamentale du contrôle qui est la première étape de ce dernier car pour évaluer l'anomalie, il faut la voir !

Ce constat effectué, nous avons dû réaliser deux étapes en parallèle afin de répondre à deux notions que nous avons perçue lors des tests : le contrôle des anomalies et la variabilité de la décision finale.

Le chapitre 2 intitulé « Réduire la variabilité de l'évaluation humaine par l'Analyse Sensorielle » nous permet de présenter une première contribution de notre travail de recherche qui se traduit par la proposition d'une démarche générique pour percevoir puis évaluer une anomalie fondée sur les concepts de l'analyse sensorielle.

La différenciation formelle entre perception et évaluation apporte une meilleure compréhension des sources de variabilité dans le contrôle visuel. En partant des démarches largement utilisées dans le cadre de l'analyse sensorielle, nous proposons dans ce chapitre une démarche générique permettant de formaliser ces deux étapes afin de réduire la variabilité dans la décision de conformité lors d'un contrôle visuel. Ce chapitre nous permet également de présenter la démarche utilisée dans le cadre de l'entreprise d'application pour réduire la variabilité d'évaluation en agissant sur l'ensemble des causes de variabilité.

Le chapitre 3 nommé « Vers une métrologie sensorielle... », nous amène à proposer une démarche métrologie basée sur les premiers résultats obtenus au chapitre 2. Cette démarche métrologie a pour objectif de garantir, à l'image de ce qui se fait en métrologie dimensionnelle, la démarche exposée au chapitre 2 dans le temps et dans l'espace. Plus explicitement, nous proposons une métrologie permettant à la fois de détecter toute dérive de la démarche et donc de maintenir le niveau de l'évaluation humaine obtenu grâce aux méthodes exposées au chapitre 2. Ce chapitre a donc l'originalité de proposer une métrologie basée sur les concepts d'une métrologie dimensionnelle mais utilisant comme instrument de mesure, l'homme, avec ce que cela engendre comme part de subjectivité. Notre principale contrainte est alors de garantir la répétabilité et la reproductibilité de l'instrument de mesure comme toute démarche métrologique.

La quatrième étape qui représente aussi notre chapitre 4 va plus loin dans la démarche d'évaluation de l'anomalie. Il s'intitule « Evaluation d'un produit complexe sur la base de la perception sensorielle ». Jusqu'à maintenant, nous avons au travers des trois chapitres précédents, développer une méthodologie permettant de garantir la perception et l'évaluation

répétable et reproductible dans le cas d'une anomalie. Dans ce chapitre, nous parlerons d'évaluation du produit global. Proposant de prendre en compte plusieurs étapes :

- une anomalie sur une surface,

- plusieurs anomalies sur une surface,

- plusieurs anomalies sur plusieurs surfaces composant ainsi le produit,

notre démarche est alors basée sur différentes hypothèses que nous formulerons puis que nous vérifierons. Les deux principales hypothèses de notre démarche sont alors d'une part l'évaluation de l'acceptation de l'anomalie par l'utilisation de la fonction perte de Taguchi et d'autre part l'évaluation de plusieurs anomalies sur une ou plusieurs surfaces suivant une combinaison quadratique basée sur les concepts du tolérancement inertiel sensoriel.

Dans la dernière étape représentant le chapitre 5 : « Application chez Patek Philippe SA », il s'agit alors de montrer suite à l'ensemble des propositions que nous avons faite durant les chapitres précédents, leurs applications au sein de l'entreprise avec laquelle nous avons collaboré. Ce chapitre reprend alors la situation de départ et les difficultés rencontrées par l'entreprise. Appliquant alors l'ensemble des concepts et des démarches proposées, il montre l'évolution et le gain apporté par les modifications et actions effectuées après la mise en place des contributions que nous avons proposées tout au long de ce mémoire. Ce chapitre est donc en quelque sorte un bilan applicatif avant-après des démarches que nous avons développées durant ces trois années de thèse.

Chapitre 1

La subjectivité dans le Contrôle Qualité

1 INTRODUCTION

Depuis longtemps, et plus que jamais aujourd'hui, le contrôle qualité est une des fonctions essentielles que toute entreprise se doit d'assurer pour espérer satisfaire ses clients. Pour y parvenir, différents contrôles sont mis en place pour s'assurer de la qualité des produits à différents stades de leur fabrication. Le plus souvent, ces contrôles sont réalisés à partir de mesures dimensionnelles réalisées sur les produits (cotes, poids, etc.) et, plus rarement, à partir de mesures sensorielles (visuelles, olfactives, etc.).

Pour certaines entreprises, c'est pourtant sur ce dernier type de contrôle que se base la recherche de l'obtention de la satisfaction des clients. Hormis cet objectif de satisfaire le client, l'enjeu des entreprises réalisant des contrôles basés sur des mesures sensorielles est de réduire la variabilité de ces contrôles et par conséquent de gagner en efficacité en termes de délai, coût et bien évidemment de qualité (c'est le cas de l'entreprise avec laquelle nous avons collaboré, comme nous le verrons dans le chapitre 5).

C'est donc sur le contrôle sensoriel, et plus particulièrement sur le contrôle visuel des produits, qu'a porté l'essentiel de notre travail de recherche durant cette thèse. Ce type de contrôle, parce qu'il se fonde sur une évaluation parfois subjective de l'opérateur chargé de ce contrôle, induit des erreurs d'appréciation de la qualité des produits générant, soit une qualité insuffisante et donc une insatisfaction du client, soit une sur qualité et donc des coûts de reprise et/ou de retouches inutiles pour l'entreprise.

L'objectif qui nous a été fixé a donc été de proposer une méthodologie et des outils permettant de réduire la dispersion des mesures obtenues par contrôle subjectif. L'enjeu est ainsi d'obtenir une qualité pertinente, c'est-à-dire impliquant des coûts les plus faibles possibles tout en répondant toujours aux attentes des clients.

Dans une première partie de ce chapitre, nous rappellerons brièvement ce que recouvre la notion de qualité pour une entreprise industrielle. Nous présenterons alors cette notion dans le contexte d'un contrôle qualité où la subjectivité est importante. Nous cherchons ainsi à mieux prendre en compte cette subjectivité de manière à comprendre les attentes des clients. La qualité subjective, jusqu'à présent reléguée au second rang derrière le critère « utilisation du produit », occupe aujourd'hui un rôle fondamental pour le client. Le client ne

cherche plus la fonctionnalité du produit – pour lui, qui va de soi – il cherche la qualité subjective du produit.

Pour obtenir cette qualité, il est nécessaire de réaliser des contrôles spécifiques. Nous verrons donc dans une deuxième partie quels peuvent être ces contrôles.

Dans une troisième partie enfin, nous présenterons ce qui est à l'origine de cette subjectivité en rappelant les différentes étapes constituant toute évaluation. Nous détaillerons ensuite les principes de l'analyse sensorielle dont une des spécificités est précisément de prendre en compte cette subjectivité. Nous montrerons alors que le lien entre le contrôle qualité et l'analyse sensorielle est rarement fait dans la littérature et appliqué dans les entreprises. Nous défendrons quant à nous l'idée que les outils et méthodes de l'analyse sensorielle peuvent contribuer à améliorer le contrôle visuel des produits dans une entreprise.

2 LA QUALITE SUBJECTIVE

La *Qualité* est aujourd'hui devenue un terme très utilisé dans les entreprises, aussi bien dans le domaine industriel que dans le domaine des services. Au départ simplement définie comme la capacité à atteindre les objectifs opérationnels visés, elle est maintenant définie comme *"l'ensemble des caractéristiques d'une entité qui lui confèrent l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés et implicites"* [ISO 8402, 1994] ou comme *"l'aptitude d'un ensemble de caractéristiques intrinsèques à satisfaire des exigences"* [norme ISO 9000, 2000].

En pratique, la Qualité se décline sous deux formes [Pillou, 2004] :

- la Qualité externe, qui se réfère à la satisfaction du client et qui amène l'entreprise à s'assurer qu'elle répond aux exigences, tant explicites qu'implicites de ses clients.
- La Qualité interne, qui se réfère à l'amélioration du fonctionnement interne d'une l'organisation et qui amène l'entreprise à repérer les dysfonctionnements et mettre en place des moyens pour corriger ces dysfonctionnements et prévenir leur apparition.

Globalement, la Qualité vise donc à répondre aux attentes des clients tout en maîtrisant l'efficacité et l'efficience des processus de l'entreprise.

2.1 LA QUALITE PERÇUE

Dans le domaine du marketing, de nombreux travaux ont été menés sur le thème de la Qualité perçue. Ainsi, celle-ci peut être définie comme *"l'idée que l'on se fait par rapport aux sensations et à l'opinion qu'on en a"* [Balin et al., 2007].

Mais la qualité perçue répond aussi à la loi "du tout et du rien" [Balin et al., 2007]. Elle touche en effet l'ensemble du produit (le tout) mais elle peut également toucher à un détail qui choque (le rien). Cette notion fait coexister des aspects objectifs, fonctionnels et mesurables, ainsi que des aspects subjectifs liés à l'esthétique du produit, le plaisir vécu ou le relationnel du client. A l'image d'une fausse note dans une interprétation musicale ou de la faute d'orthographe dans un manuscrit, un défaut même mineur peut induire une perception différente d'un produit et, parfois même, changer du tout au tout la perception d'ensemble que le client a de ce produit. Dans [Plichon, 1998], cette qualité perçue est ainsi définie comme *"un état affectif provenant d'un processus d'évaluation affectif et cognitif qui survient lors d'une transaction spécifique"*.

2.2 LA QUALITE ATTENDUE

Classiquement, la Qualité attendue correspond à l'attente du client [Gotlieb et al., 1994]. L'entreprise doit donc être en mesure d'anticiper cette attente, voire la combler [Lewis et al., 1993]. Historiquement, cette attente fait souvent référence à des critères de robustesse, de fiabilité, de disponibilité et/ou de technologie à atteindre pour le produit. Elle s'est ensuite engagée sur la voie de la recherche du "meilleur rapport qualité/prix". Aujourd'hui, elle répond également à des critères relevant du plaisir du client. Ainsi, non seulement le produit doit-il répondre à l'usage auquel il est destiné et pour lequel il a été conçu, mais il doit de plus répondre au plaisir que le client attend de sa perception et de son utilisation.

2.3 LA SATISFACTION CLIENT

2.3.1 LES DIFFERENTS ECARTS

La satisfaction d'un client résulte de l'écart d'appréciation entre sa Qualité perçue et sa Qualité attendue (Figure 2)

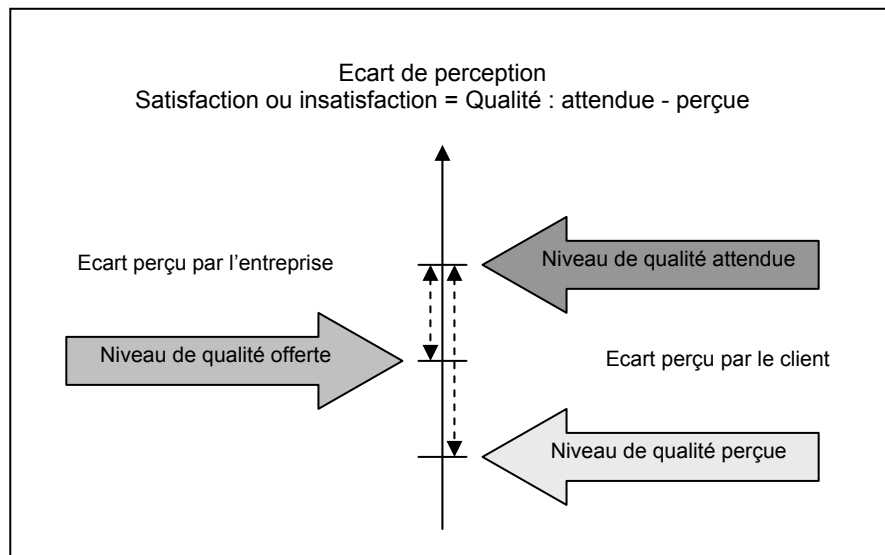


Figure 2 : Qualité perçue et satisfaction du client, un écart de perception [Giordano, 2006]

Cependant, il faut noter que le client n'exprime pas forcément l'ensemble de ses attentes, ce qui peut avoir pour effet de renforcer encore cet écart. L'entreprise doit donc être capable de réduire cet écart perçu par l'entreprise. Plus cet écart sera petit, plus et mieux l'entreprise se positionnera par rapport à la concurrence et fidélisera ses clients [Lewis et al., 1993].

Les travaux de Parasuraman, Zeithaml et Berry [Parasuraman et al., 1985] complètent le schéma de la Figure 1 en proposant le Modèle 'Gaps' définissant des écarts entre les attentes du consommateur et ses perceptions de la performance du service réalisée par le produit (Figure 3).

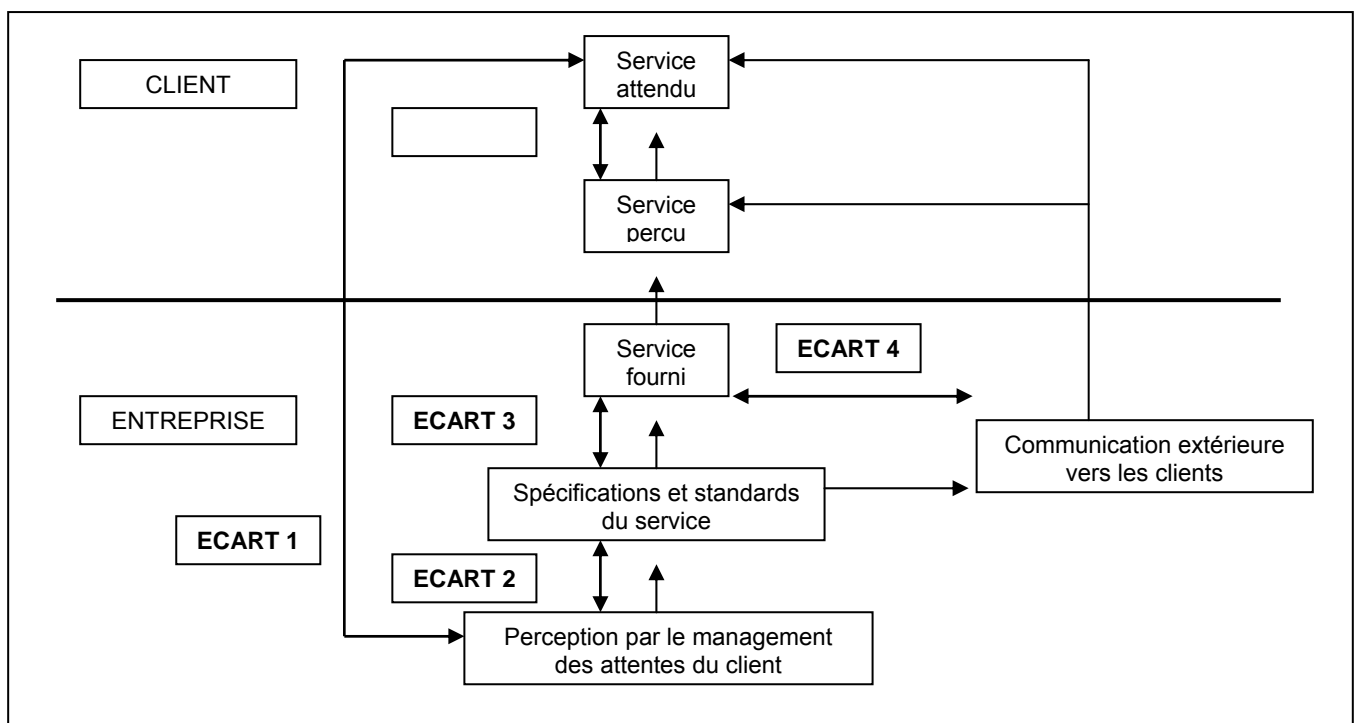


Figure 3 : Modèle 'gaps' [Parasuraman et al., 1985]

Plusieurs écarts peuvent ainsi être observés :

- l'écart 1 exprime la différence entre les attentes du consommateur et ce que l'entreprise perçoit de ces attentes.
- l'écart 2 exprime la différence entre les perceptions et leur traduction par l'entreprise en termes de spécifications de la prestation ou du produit.
- l'écart 3 exprime la différence entre les spécifications et ce qui est effectivement fourni.
- l'écart 4 exprime la différence entre ce qui est délivré et la communication externe de l'entreprise, c'est à dire la promesse faite au client par l'entreprise.
- l'écart 5 exprime la différence entre le service attendu et le service reçu par le consommateur. Si le service reçu est différent du service attendu, il y aura déception et le client jugera le service de mauvaise qualité (perception du client).

2.3.2 CORRESPONDANCE ENTRE NIVEAU D'OFFRE ET NIVEAU DE QUALITE PERÇUE

Chaque niveau de prix doit correspondre à un niveau de qualité perçue (Figure 4).

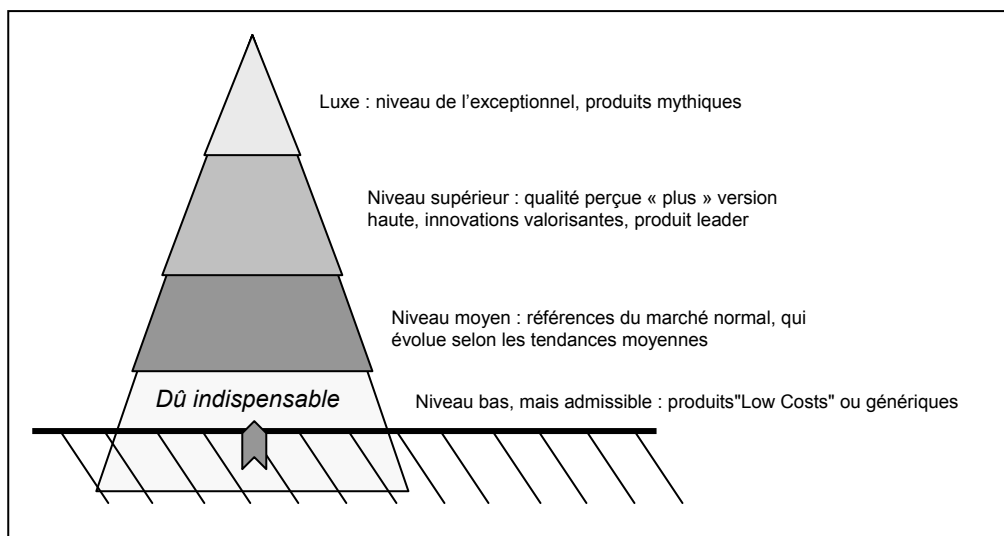


Figure 4 : A chaque niveau de prix, sa qualité perçue [Giordano, 2006]

Plus le prix sera important, plus l'attente du client sera élevée. En effet, lorsqu'une gamme de produit est proposée à un client, ce dernier s'attend à être d'autant plus satisfait que le prix sera élevé. Plus il fera un investissement, plus il sera satisfait car le produit répondra d'une part à ses principales attentes mais aussi à d'autres services qu'il ne pensait pas obtenir. Le produit sera donc davantage évolué qu'il en sera coûteux.

2.4 LA REPONSE DES ENTREPRISES

"*La qualité, ça se paye !*". Cette expression qu'on a l'habitude d'entendre est devenue un mot d'ordre de nos jours et, comme dit précédemment, vraie pour les clients. Mais l'est-elle également pour les entreprises ? Comment font-elles pour rester compétitives face à ce rapport qualité-prix ?

Le contrôle qualité des produits peut être subdivisé en trois parties que nous détaillerons au paragraphe 3.1 :

- le contrôle fonctionnel
- le contrôle technique
- le contrôle d'aspect

Faire la différence entre ces trois types de contrôle permet alors de détecter la majorité des problèmes qualité que peut rencontrer une entreprise.

Dans une entreprise aujourd'hui, les efforts sont surtout faits dans le domaine dimensionnel. En fait, lorsqu'un produit passe de l'étape de conception à l'étape de production, il est rare de relever des problèmes de fonctionnalité sur ce produit. Les principales difficultés reposent en effet plutôt sur des éléments qui ne sont pas mesurables et qui n'ont pas pu être pris en considération lors de l'étape de conception. Dans l'entreprise d'application, nous évaluons à 80% les défauts non mesurables et à 20% les défauts mesurables.

Cependant, si nous regardons les actions réalisées par les entreprises pour diminuer les problèmes de non qualité, nous constatons que cette proportion entre le non-mesurable et le mesurable s'inverse dans les dépenses engagées (Figure 5).

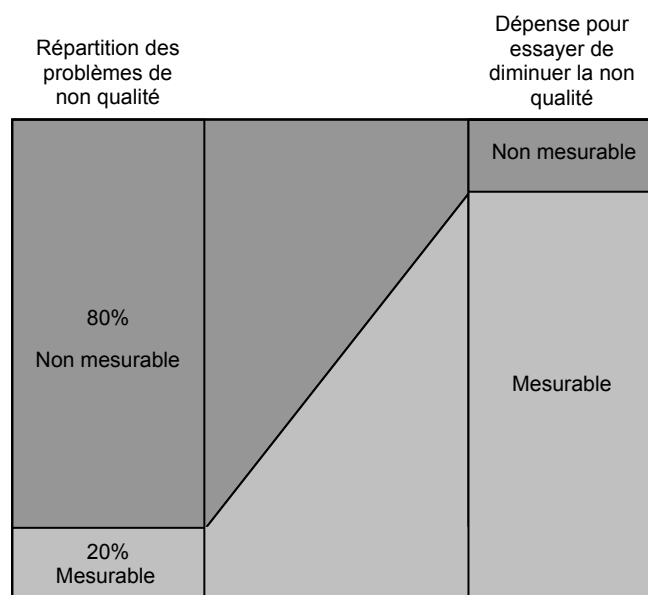


Figure 5 : Répartition problèmes-coûts

Dans le cas d'un contrôle subjectif tel que le contrôle d'aspect de pièce, les moyens mis en œuvre pour effectuer le contrôle et les outils développés pour cela sont quasi inexistants. Les problèmes sont par conséquent toujours présents. D'une part, cette non qualité n'est pas mesurée correctement car les instruments de mesure pour ce type de contrôle sont très peu nombreux. D'autre part, le non mesurable fait intervenir des critères très subjectifs et la culture d'entreprise a généralement tendance à privilégier des paramètres qu'elle sait déterminer et auxquels elle est en mesure d'associer un chiffre de performance (tolérance, indicateur...). Les actions correctives n'en sont que plus difficiles à mettre en œuvre.

Dans le cas d'un contrôle parfaitement mesurable (par exemple, relevé de mesure d'un diamètre d'une pièce, d'une longueur, d'un angle géométrique), le panel des instruments de mesure est considérable puisqu'il peut aller du simple instrument comme une règle graduée aux instruments les plus développés comme une machine tridimensionnelle. Chaque instrument de mesure doit donc être adapté au contexte du contrôle car, bien évidemment selon le type d'instrument choisi, le coût du contrôle peut être élevé. Plusieurs éléments peuvent être retenus pour choisir l'instrument à utiliser : des tolérances acceptables, une incertitude de mesure, le niveau de précision, de justesse demandée à la mesure, la rapidité de prise de la mesure, etc.

Le domaine du mesurable est donc aujourd'hui très bien maîtrisé dans les entreprises. Cela peut expliquer l'importance des dépenses que celles-ci engagent à l'heure actuelle pour diminuer leurs problèmes de non qualité sur des aspects mesurables. Ces problèmes sont pourtant souvent très peu nombreux par rapport aux problèmes de non qualité sur des aspects non mesurables. Nous détaillons maintenant quels types de contrôle sont mis ou peuvent être mis en place pour diminuer ces problèmes.

3 UN CONTROLE POUR LE NON MESURABLE

Un *Contrôle Qualité* désigne ce qui concourt à la vérification de la conformité d'un produit ou d'un service à des spécifications préétablies et incluant une décision d'acceptation, de rejet ou de retouche. Dans la norme [ISO 8402, 1994], il est défini comme l'ensemble des "activités telles que mesurer, examiner, essayer ou passer au calibre une ou plusieurs caractéristiques d'une entité et comparer les résultats aux exigences spécifiées en vue de déterminer si la conformité est obtenue pour chacune des caractéristiques" [ISO 8402, 1994].

Dans la littérature, le contrôle est classiquement décrit comme un acte technique qui permet de déterminer la conformité du produit. Il suppose donc que les caractéristiques du produit aient été définies et que des limites aient été établies pour juger sa conformité. A partir de ces informations, un Contrôle Qualité peut délivrer plusieurs résultats (Figure 6) :

- le produit est conforme
- le produit est non conforme et doit être rebuté
- le produit est non conforme et peut être accepté en dérogation

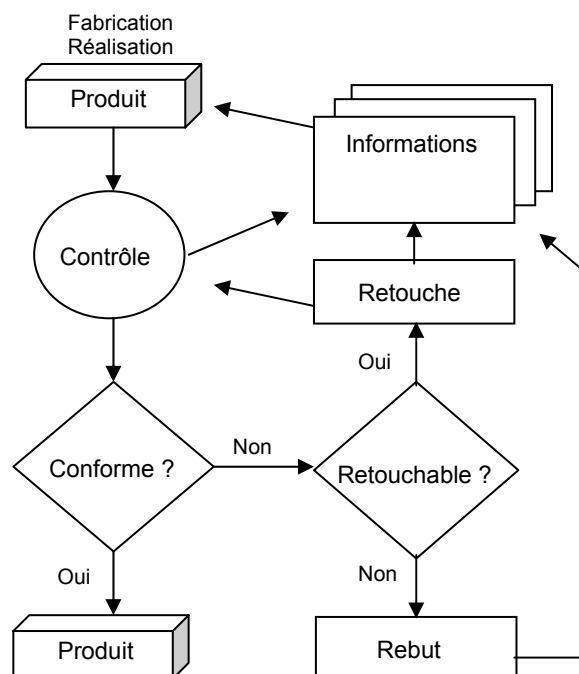


Figure 6 : Flux de la décision finale d'un Contrôle Qualité [adapté Wikipédia]

Défini comme tel, il est parfois coutume de dire que le contrôle est à la qualité un "mal nécessaire". En effet, il s'agit de mettre en place des contrôles tout le long du processus de fabrication pour s'assurer à plusieurs endroits de ce processus que la qualité est toujours garantie. Ces contrôles permettent donc de s'assurer de la conformité du produit lors du passage d'une étape à une autre étape du processus. Cependant, cette répétition des contrôles, étape après étape, est aussi en quelque sorte la reconnaissance de ne pas savoir faire et de ne pas savoir assurer un produit conforme dès la première étape de sa réalisation. En d'autres termes, on pourrait presque dire que contrôler c'est s'assurer que l'on ne sait pas faire, que le produit n'est pas conforme. S'attacher à éliminer ces contrôles signifie donc être en mesure de garantir la conformité du produit.

3.1 LES TYPES DE CONTROLE QUALITE

Il existe trois grands types de Contrôle Qualité, couvrant à eux seuls la majorité des problèmes qualité que peut rencontrer une entreprise :

- le contrôle fonctionnel : toutes les côtes fonctionnelles du produit, c'est-à-dire toutes les surfaces qui assurent la bonne fonctionnalité du produit, sont mesurées. Totalement mesurable, ce contrôle se réfère à un plan technique pour valider ou non la conformité du produit.
- le contrôle technique : le traitement de surface du produit est examiné. Ce contrôle répond à des questions du type : ce satinage est-il un bon satinage ? Ce polissage est-il conforme à l'image de marque de la société ? Non mesurable, ce contrôle peut cependant être effectué à l'aide d'une comparaison avec des cales étalons définissant une gamme de produits allant du moins acceptables au plus acceptables.
- le contrôle d'aspect : les anomalies d'aspect pouvant être créées lors de la fabrication ou pendant la manipulation sont détectées. Il s'agit d'anomalies, telles que marques, raies, tâches, etc., qui sont difficilement détectables dans un contexte de production. Dans ces cas, on dit qu'il s'agit de défauts accidentels. Pour ce type de contrôle, il est difficile, voire impossible, de se raccrocher à un document de référence pour définir l'acceptabilité ou non de la pièce. Le contrôle est donc totalement subjectif et non mesurable. C'est donc le savoir faire du contrôleur qui lui permet de détecter l'anomalie et d'en estimer la gravité.

3.2 LES CONTROLES REpondant A LA QUALITE SUBJECTIVE

3.2.1 DES MESURES SUBJECTIVES BASEES SUR LE RESENTI DU SUJET

La Figure 7 explique le processus suivi par le sujet lorsqu'il doit effectuer une mesure subjective sur un produit afin de s'assurer si celui-ci respecte ou répond ou non à l'attente du client, et donc, à la Qualité attendue. Ce processus s'effectue en trois étapes.

Le sujet reçoit un stimulus par son récepteur sensoriel. Il traite ensuite l'information en essayant d'analyser, d'une part ce qu'il reçoit comme information, et d'autre part, ce qu'il doit transmettre et comment il doit le transmettre pour bien faire comprendre le message qu'il cherche à faire passer. La dernière étape du processus consiste pour ce sujet à exprimer sa perception ce qui, dans une certaine mesure, revient pour lui à exprimer aussi sa sensation personnelle vis-à-vis de ce qu'il perçoit en sa globalité. Notons les aspects très subjectifs présents durant ce processus.

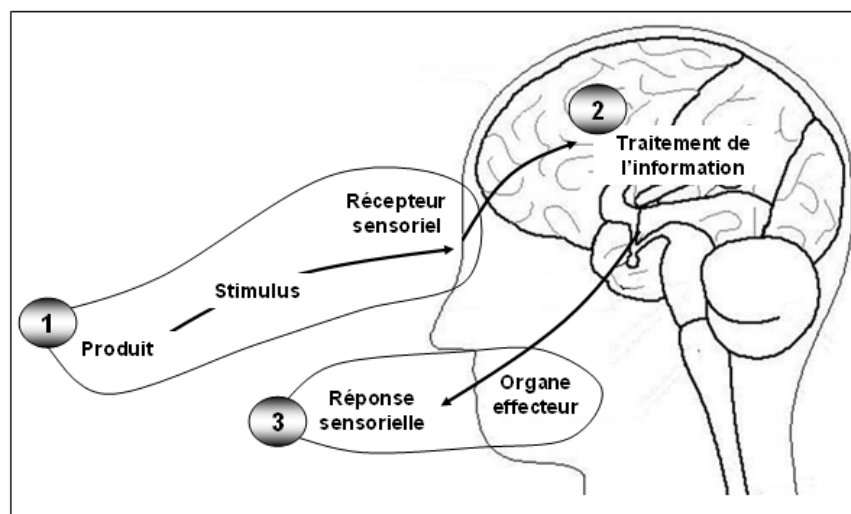


Figure 7 : Processus de la mesure subjective

Une mesure subjective s'effectue donc sur la base d'un examen du produit qui fait appel à l'un des cinq sens du sujet. D'une manière générale, Il est préférable de séparer, lorsque cela est possible, les sens et d'évaluer leur réponse séparément.

3.2.1.1 EXAMEN DU GOUT

Comme son nom le suggère, il s'agit d'utiliser comme récepteur sensoriel, la bouche ou plus précisément le palet.

Ce type d'examen est donc typiquement utilisé dans le cadre de contrôles de produits de consommation alimentaire (par exemple, yaourts, céréales, bières, vins, etc) . De grandes entreprises, comme Nestlé par exemple [Martin, 2005], réalisent donc des examens du goût du produit afin de trouver "la recette" qui plaira à leurs clients.

3.2.1.2 EXAMEN DE L'AUDITION

Le récepteur sensoriel est l'ouïe. Des travaux de recherche ont été réalisés sur la perception des bruits (par exemple, ceux de Sylvie Morange [Morange et al., 2005]) sur la perception de la musique).

Nous pouvons aussi mentionner les études menées sur la perception des nuisances sonores qui permettent d'expliquer jusqu'à quel point il est possible de considérer un bruit comme un son ou comme une nuisance [Morange et al., 2005].

3.2.1.3 EXAMEN DE L'ODORAT

Sentir un aliment, un liquide ou un objet quelconque est bien souvent une première étape avant d'examiner le produit en faisant appel à un autre sens. Dans le cas du vin ou la bière par exemple, le sujet regarde d'abord la robe du vin, le sent puis le met sur son palet [Gufoni et al., 2005].

3.2.1.4 EXAMEN DU TOUCHER

Ce sens n'est pas le sens le plus développé en terme de mesures subjectives. Cependant dans certains domaines, comme par exemple celui de l'automobile, le toucher est utilisé pour évaluer certains produits : tissus des fauteuils, tableau de bord... [Dumont, 2007]. Il s'agit alors d'utiliser, en respectant certaines consignes très précises la main ou/et les doigts comme récepteur sensoriel pour examiner le produit.

3.2.1.5 EXAMEN VISUEL

L'examen visuel paraît le plus souvent le plus simple des examens à mettre en oeuvre. Cependant, et nous le verrons dans le prochain paragraphe, cet examen peut s'avérer très délicat selon le niveau d'examen que l'on cherche à obtenir. A noter aussi, que dans certains domaines tels que les différents examens que nous avons développés ci-dessus, il est souvent recommandé de ne pas faire appel à ce sens pour éviter la confusion dans les résultats obtenus. Par exemple, lors d'un examen utilisant le goût, les différents produits sont le plus souvent masqués de manière à éviter des perturbations sur les résultats de l'examen [Chollet et al., 2006].

3.2.2 LES INFLUENCES DES ELEMENTS EXTERIEURS SUR L'EXAMEN VISUEL

L'examen visuel est considéré comme un procédé optique et il est généralement considéré, nous l'avons dit, comme le plus simple des examens à mettre en œuvre. Il ne nécessite en effet pas le recours à des instruments de contrôle spécifiques et dédiés aux produits à contrôler. Souvent utilisé comme un examen préalable à un autre contrôle, il permet parfois de guider le sujet dans le choix des moyens techniques à utiliser pour effectuer la mesure. L'examen visuel est par conséquent à la fois un examen préalable à un contrôle relevant du domaine du mesurable et relevant du domaine du non mesurable par la subjectivité qu'il peut induire.

Bien souvent, la littérature classe le cas de l'examen visuel comme faisant partie des outils pour réaliser des Contrôles Non Destructifs (CND) afin de délivrer des mesures "chiffrées". Dans les techniques de l'Ingénieur, le Contrôle Non Destructif (CND) est défini comme *"l'ensemble des techniques et procédés aptes à fournir des informations sur la santé d'une pièce ou d'une structure sans qu'il en résulte des altérations préjudiciables à leur utilisation ultérieure"* [Dumont-Fillon, 1996]. A titre d'exemple, on peut citer le cas d'un comparateur sur un marbre pour contrôler le parallélisme d'une surface par rapport à un référentiel donné. L'instrument permet alors de quantifier le défaut de non parallélisme et de déterminer si la pièce est acceptable ou non en comparant la mesure obtenue et la référence prédéfinie. Cependant, et nous le verrons au travers de notre problématique et des solutions que nous proposons, l'examen visuel peut être aussi utilisé dans le cas de contrôle non mesurable comme l'évaluation subjective d'une pièce face à un critère d'acceptabilité - tout aussi subjectif.

Pour l'essentiel, ce procédé optique peut s'appliquer à des contrôles dimensionnels, donc mesurables. Dans ce domaine, les entreprises ont fait beaucoup d'efforts pour atteindre une bonne maîtrise de leurs contrôles et garantir ainsi la fiabilité de leurs résultats.

Mais ce procédé peut également concerner d'autres contrôles, comme par exemple l'appréciation esthétique du produit pour laquelle une quantification précise des résultats de la mesure est difficile à obtenir à cause de la grande part de subjectivité qu'induit ce type de contrôle. Dans ce domaine, les outils et instruments mis à la disposition des entreprises sont peu nombreux.

Pour réaliser un examen visuel, plusieurs paramètres sont importants pour garantir la qualité du résultat délivré. Nous les détaillons maintenant.

✱ L'éclairage

Afin que l'œil du contrôleur travaille avec la meilleure acuité, il est nécessaire que le contrôle s'effectue dans des conditions énergétiques, de luminosité et de longueur d'ondes optimales. Par exemple, les techniques de l'Ingénieur [La Toison, 1986] préconisent un éclairage de plus de 300 lux en lumière vert-jaune à 0,55µm. Ces conditions peuvent bien évidemment varier selon le type de pièce contrôlée, la capacité du contrôleur ou encore le niveau de fiabilité attendu pour le contrôle effectué. Ainsi, la norme [AFN, X35-103, 1990] préconise par exemple un éclairage compris entre 1500 et 2000 lux pour un travail très délicat ou pour un contrôle réalisé sur de très petites pièces. Cette recommandation est elle-même à adapter en fonction de certaines conditions du contrôle comme:

- le travailleur a-t-il plus de 50 ans ?
- les facteurs de réflexion et les contrastes sont-ils particulièrement faibles ?
- des erreurs lors de l'examen visuel peuvent-elles avoir des conséquences sérieuses ?
- l'examen visuel est-il occasionnel ?
- le local est-il aveugle ?

La présence de tous ces facteurs peut alors nécessiter le recours à un éclairage de 3000 lux.

L'intensité d'éclairage étant définie, il faut également adapter le type et l'orientation de l'éclairage à la nature des défauts. Ainsi :

- l'éclairage diffus est utilisé dans la recherche de défauts variés sans orientation définie,
- l'éclairage directif est utilisé dans la recherche de défauts sensiblement situés dans la même direction (par exemple des rayures) associés à une observation de la surface sous un angle voisin de celui de la réflexion spéculaire,
- l'éclairage rasant est privilégié pour la recherche de défauts présentant des reliefs.

✖ *L'œil*

Si l'œil est considéré comme un capteur optique performant, il peut présenter cependant quelques limites. La lecture d'une image peut en effet occasionner des problèmes objectifs et/ou des problèmes subjectifs. Les problèmes objectifs sont de nature purement physiologique, résultant principalement d'une acuité visuelle insuffisante du contrôleur. Les problèmes subjectifs résultent quant à eux d'écarts de perception et de conscience de l'image observée par le contrôleur. Ces problèmes sont difficiles à analyser, à mesurer et à prendre en compte puisqu'ils dépendent de plusieurs facteurs comme la fatigue nerveuse, l'attention de l'observateur ou son état d'esprit au moment du contrôle.

✖ *Les supports optiques à la vision*

Pour limiter ces problèmes, des supports complémentaires sont mis à la disposition au contrôleur en charge du contrôle visuel des produits. Ce sont par exemple :

- les verres grossissants,
- les loupes binoculaires,
- le microscope métallographique,
- l'appareil photographique,

ainsi que certains appareils optiques spécifiques comme, par exemple :

- l'endoscope,
- le stroboscope,
- la télévision.

Concernant ces supports, de nombreux travaux de recherche mettent en évidence la différence entre une évaluation subjective et l'évaluation "concrète" qui est réalisée

3.2.3 DES MESURES DE PLUS EN PLUS OBJECTIVES

Nous avons vu que dans le cas d'examen visuel, des solutions telles que des capteurs optiques pouvaient conforter cet examen subjectif par une mesure. Celle-ci peut ensuite être comparée à une mesure de référence ou à une tolérance d'acceptabilité.

L'examen visuel n'est cependant pas le seul examen à pouvoir être complété par des outils de mesure. Par exemple, [Mojet et al., 2005] montre la comparaison possible entre l'examen du goût d'un aliment et la mesure de texture de cet aliment. Une fois la comparaison des résultats réalisée, il est ensuite possible de faire le parallèle entre ces deux notions et d'en trouver une relation de causes à effets. De même dans le domaine du toucher, Renault [Dumont et al., 2007] a développé un doigt thermique capable de mesurer les sensations tactiles provoqués par le tissu examiné. En mettant en relation cette mesure avec le ressenti du sujet réalisant sa propre évaluation subjective sur le tissu, il est ensuite possible de déduire une relation entre les deux évaluations, l'une mesurable et objective, l'autre non mesurable et subjective. Le Tableau 1 donne les relations qui peuvent établir ces deux types d'évaluation.

Domaine subjectif	Répondant mesurable	Référence
Le goût	Mesure de texture	[Dacremont, 2003] [Pensé-Lhéritier, 2006]
L'ouïe	Mesure des sons, de l'intensité, des notes...	[Gaillard et al., 2006]
L'odorat	Chimie des molécules Nez électronique	[Nesa et al.a, 2004] [Nesa et al.b, 2004]
Le toucher	Doigt thermique	[Dumont et al., 2007]
La vue	l'endoscope, le stroboscope, la télévision	[Meniszez et al., 2004]

Tableau 1 : Comparaison domaine subjectif – Répondant mesurable

Le Tableau 1 montre que de nouveaux instruments de mesure peuvent aider à mieux qualifier le goût, l'ouïe, l'odorat, le toucher et la vue puisqu'ils permettent de traduire des

données non mesurables par des données mesurables. Ces instruments replacent en quelque sorte le fonctionnement de nos organes sensoriels et peuvent se substituer totalement ou partiellement à l'être humain, et ceci dans le but de réduire les effets de la subjectivité de la mesure. A la fois fiables, justes et reproductibles, ces instruments peuvent ainsi être vus comme le moyen d'éliminer certaines tâches ingrates ou fastidieuses relevant du contrôle qualité.

Il est toutefois important de souligner que la mesure de l'instrument et la mesure du sujet sont souvent complémentaires, une machine ne pouvant pas par exemple apprécier plusieurs dimensions d'un produit. Le cerveau humain peut en revanche intégrer les données par un ensemble de stimuli aussi bien visuels, olfactifs, gustatifs, etc. et les traduire en une information multidimensionnelle. De plus, l'être humain est le seul à pouvoir rendre compte de manière verbale d'une perception sensorielle. Ce dernier point est fondamental et confère donc un rôle primordial à l'approche sémantique.

Si les progrès pour remplacer l'homme par des instruments sont très encourageants au vu des résultats obtenus, nous voyons cependant bien la nécessité de réaliser un travail visant à établir les relations entre les résultats de l'homme et ceux de la machine. Le travail que nous avons réalisé sur les contrôles esthétiques de pièces doit donc être aussi perçu comme un travail en amont du développement des capteurs dédiés à un contrôle visuel. Utiliser ces capteurs suppose en effet que l'on soit au préalable capable d'effectuer la mesure correctement, c'est à dire de manière répétable et reproductible.

4 L'EVALUATION SUBJECTIVE

Nous sommes tous capables d'évaluer un produit simplement en le regardant ou en le goûtant, mais chacun d'entre nous met dans cette évaluation une part de subjectivité différente. Des méthodes doivent être développées pour réduire au maximum cette part de subjectivité. Ces méthodes trouvent leur fondement dans l'analyse sensorielle.

4.1 QUELQUES CONCEPTS

L'évaluation sensorielle a été développée dans les années 30, principalement dans le secteur de l'agro alimentaire et à cause de l'absence de méthodes instrumentales adéquates pour mesurer ce que perçoivent nos sens, perception par nature non mesurable. Puis c'est en 1964 que la première méthodologie a été publiée.

4.1.1 PERCEPTION ET SENSATION

La perception est une étape majeure de l'évaluation sensorielle. Elle est composée de trois phases : l'activation des récepteurs sensoriels, l'acquisition de l'information envoyée par ses mêmes récepteurs et la traduction en sensations.

Le mot *Perception* peut avoir un double sens. Nous pouvons en effet parler de perception par les sens et de perception par l'esprit. Ceci s'explique surtout par la psychologie où la perception est à la fois le processus de recueil mais aussi de traitement de l'information sensorielle (Figure 8). Nous voyons donc que la perception ne se réduit pas à l'acuité visuelle mais intègre aussi le traitement que l'on en fait.

On parle alors de perception immédiate pour faire référence à l'information que nous délivrent nos sens lorsqu'ils perçoivent un objet. Elle va donc provoquer des phénomènes au niveau des organes des sens et au niveau du système nerveux central lorsqu'une personne va réagir à un stimulus externe.

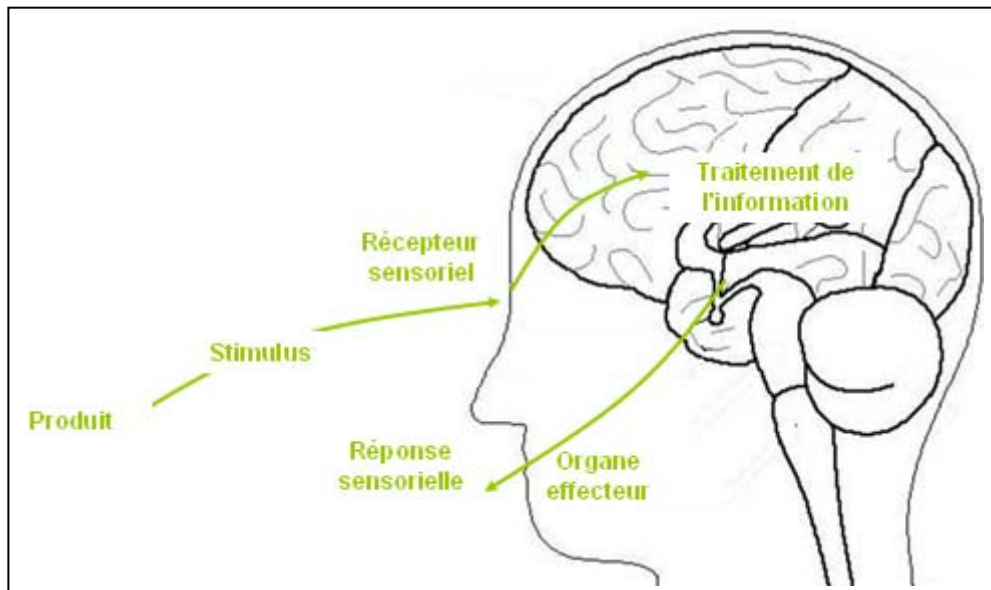


Figure 8 : Processus de perception : Recueil et de traitement de l'information sensorielle

Nous voyons ainsi apparaître toute la problématique d'une évaluation sensorielle. Il s'agit de disposer d'un récepteur sensoriel optimum mais aussi d'un traitement de l'information en adéquation avec ce pourquoi l'évaluation sensorielle est effectuée. Nous allons alors devoir travailler sur ces deux points afin d'obtenir des résultats exploitables et donc uniformément mesurables par les différents instruments de mesure (i.e. les consommateurs).

Mesurer des événements sensoriels a été possible grâce à une science dite de psychologie expérimentale : la psychophysique. Cette dernière consiste à déterminer la relation qui peut s'établir entre le stimulus physique, la perception et la représentation mentale que l'on en a. Par exemple, lors d'une évaluation sensorielle auditive afin d'étudier la fréquence d'un son perçue, l'approche va consister à modifier le niveau du son (ce qui représente le stimulus physique) et en même temps à recueillir les jugements des sujets suivant cette évaluation. La psychophysique définit alors un seuil de détection qui représente un niveau en dessous duquel un individu n'est plus capable de dire s'il y a présence d'une stimulation. Ce seuil peut être aussi appelé seuil différentiel lorsque le niveau ne permet pas à l'individu de distinguer deux stimulations.

La psychophysique a connu deux principaux mouvements.

Pierre Bouger en 1760, puis Ernest Weber en 1831 ont travaillé sur la recherche de la plus petite variation physique perceptible d'un stimulus. Ainsi, la loi Bouger-Weber [Loukil et al, 2005] exprime que le seuil différentiel augmente linéairement avec la valeur du stimulus étalon. Le médecin Gustav Fechner, qui est d'ailleurs inventeur du terme psychophysique, a modifié cette loi afin de la rendre valide aux valeurs extrêmes de stimuli. La principale caractéristique de ce premier mouvement est de considérer qu'une sensation ne peut jamais être mesurée directement. L'homme peut seulement mesurer et comparer s'il y a une différence dans les sensations perçues. Par conséquent, *"la sensation varie comme le logarithme de l'excitation"* [Fechner, 1860] [Fechner, 1877]

$$I = k \ln S$$

Avec I : intensité de la sensation

S : grandeur du stimulus

k : constante de proportionnalité

En 1964, Stevens [Stevens, 1964] propose une généralisation de la loi de Weber-Fechner en considérant que la sensation est liée à la stimulation par une loi de puissance. Par rapport à

la loi de Weber-Fechner, Stevens considère qu'il n'est pas possible de mesurer une seule sensation indépendamment des autres. Un individu est en effet capable de dire si la sensation provoquée par A est deux fois plus importante que celle provoquée par B. Stevens considère également que si deux rapports d'intensité du stimulus sont égaux alors les deux rapports d'intensité de la sensation correspondante sont aussi égaux. La loi de Stevens exprime l'insensibilité d'une sensation par :

$$I = k S^n$$

4.1.2 LA PERCEPTION N'EST PAS SEULEMENT RECEPTION...

Percevoir le défaut ne s'arrête pas seulement à vérifier si l'acuité visuelle des personnes peut être considérée comme acceptable ou pas. Bien sûr, ce critère ne peut pas être ignoré mais il doit être basé sur la bonne manière de traiter l'information. Une des journées du Sensolier¹ (13/10/2006) sur la notion d'expertise, nous a confirmé cette idée que la perception ne se limite pas à une perception immédiate, i.e. le recueil de l'information sensorielle [Goasdoué, 2006].

Dès 1930, Bernstein [Bernstein, 1930] soulignait d'ailleurs le rôle parfois très réducteur, et en tout cas très artificiel, donné à la perception dans les expériences menées en laboratoire, les individus réalisant cette perception étant considérés comme totalement neutres et passifs par rapport aux actions situées en aval de cette perception. Bergson [Bergson, 1934], puis Gibson [Gibson et al., 1979] et O'Regan [O'Regan, 1992] expliciteront plus tard ce lien très net entre, d'une part, la perception et, d'autre part, les différentes actions pouvant résulter de cette perception. L'ensemble de ces travaux de recherche, par exemple [Rensink et al., 1997], ont d'ailleurs montré que la perception n'est pas seulement le résultat de la vision. En effet, même si le sujet n'a pas de problème d'acuité visuelle, certaines modifications d'une image dans un instant très court peuvent ne pas être perçues si l'attention du sujet est focalisée sur un autre événement visuel.

4.1.3 TRAITEMENT DE L'INFORMATION

Le stimulus perçu par le récepteur sensoriel, l'individu va devoir convertir à la fois sa perception et sa sensation en mot pour pouvoir faire comprendre ce qu'il a perçu. Cette restitution est d'autant plus difficile que chacun a sa propre sensibilité.

Le message transmis englobe bien sûr de l'information, mais il englobe également une part plus ou moins importante de subjectivité que le récepteur ne parvient pas toujours à clairement distinguer. Cette difficulté est généralement le résultat des transformations successives que l'information utile portée par ce message subit à différentes étapes de sa transmission, depuis sa sélection par l'émetteur jusqu'à son appropriation par le récepteur (Figure 9). Ces transformations expliquent une partie des écarts de contrôle relevés d'un individu à l'autre.

¹ <http://www.lesensolier.com/>

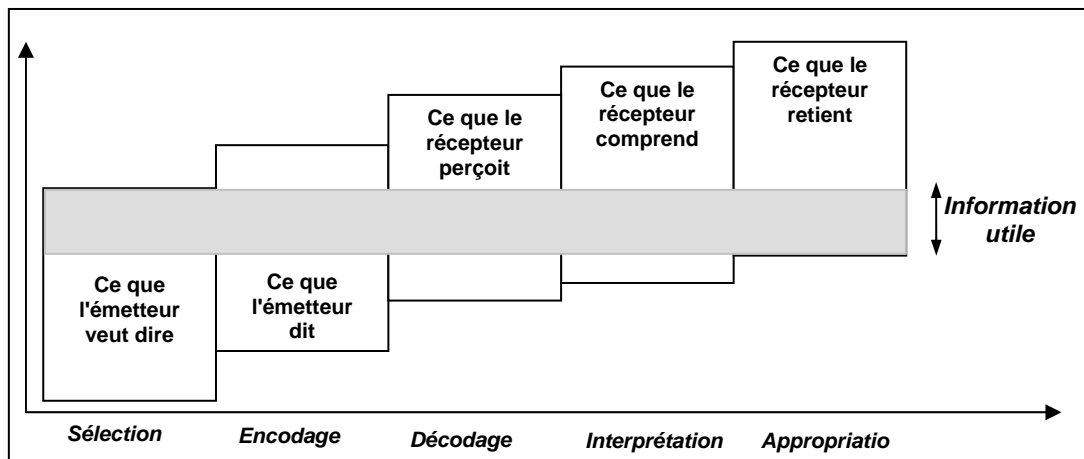


Figure 9 : Contrôle visuel : les étapes de transmission de l'information

A ce problème de la transmission de l'information s'ajoute également celui de son expression. L'émetteur et le récepteur de l'information ne partagent en effet pas toujours le même vocabulaire et/ou ne donnent pas nécessairement le même sens aux termes utilisés pour exprimer cette information. Dans l'entreprise, cela se traduit effectivement par l'utilisation simultanée de plusieurs listes de défauts, utilisées à différents stades du contrôle visuel, et se référant pourtant à des anomalies parfois identiques sur les produits.

4.1.4 LES METHODES DE L'EVALUATION SUBJECTIVE

Nous avons vu que l'évaluation subjective était l'évaluation que l'on faisait d'un objet suivant diverses éléments extérieurs. Cette évaluation peut être réalisée suivant différentes méthodes dont les principales sont présentées en Figure 10.

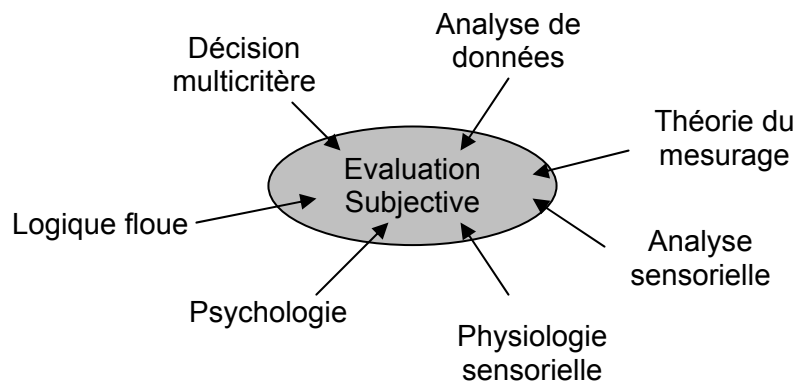


Figure 10 : L'évaluation subjective et ses domaines connexes [CRIN, 1997]

Ces méthodes ne répondent cependant souvent qu'à certains aspects du problème soulevé par la subjectivité de l'évaluation. Souvent, il est nécessaire d'associer plusieurs de ces méthodes pour réaliser une étude complète. Voyons alors succinctement chacune de ces méthodes.

- La décision multicritère : il s'agit d'étudier les méthodes de choix en fonction de plusieurs critères. Cette méthode est basée sur l'évaluation des préférences.
- L'analyse de données : ce domaine regroupe un ensemble de méthodes permettant d'extraire l'information à partir d'une quantité importante de données.
- La théorie du mesurage : cette théorie se base sur les fondements mathématiques afin de pouvoir mesurer les grandeurs.

- L'analyse sensorielle : il s'agit d'une méthodologie basée sur les sens physiques (vue, ouïe, toucher, goût, odorat) de l'instrument de mesure qui est dans ce cas là un jury d'experts.
- La physiologie sensorielle : c'est l'étude du fonctionnement des sens.
- La psychologie : elle s'intéresse au processus de perception de l'objet par le sujet.
- La logique floue : cette technique est basée sur une évaluation de l'objet réalisée à partir d'une échelle allant de 0 à 1.

A partir de la définition de ces méthodes, nous voyons que leur utilisation va dépendre, d'une part du contexte de l'évaluation, et d'autre part des données pouvant être recueillies.

Pour répondre à notre problématique, seules l'analyse sensorielle et l'analyse des données peuvent être utilisées. Nous les détaillerons respectivement dans le prochain paragraphe et dans l'Annexe 3. En effet, il s'agit pour nous d'évaluer des produits dans le cadre d'un contrôle qualité en répondant à une question du type : le produit est-il *Conforme* ou *Non-conforme* ?

Les autres méthodes sont en revanche peu ou pas adaptées à notre problématique.

La décision multicritère se base sur les préférences, ce qui va à l'encontre de notre objectif qui est de réduire au maximum la part de subjectivité dans le contrôle pour réduire la variabilité des réponses.

La théorie du mesurage traite des mesures et dans notre cas – en début d'étude – aucune mesure n'est envisageable.

La physiologie et la psychologie semblent loin de la problématique industrielle.

La logique floue, tout comme la théorie du mesurage, utilise des données quantitatives et non des données qualitatives comme par exemple *Conforme* et *Non-conforme*.

4.2 L'ANALYSE SENSORIELLE

L'analyse sensorielle est une méthode permettant de réaliser l'évaluation subjective d'un produit donné. Elle consiste alors à définir les caractéristiques d'un produit grâce aux cinq sens humains.

4.2.1 LES PRINCIPES DE BASE

Avant de détailler la démarche préconisée par cette méthode d'évaluation subjective, définissons quelques termes propres à cette dernière.

4.2.1.1 LES SUJETS

En analyse sensorielle, un sujet représente, en faisant une analogie avec la métrologie dimensionnelle (utilisée lorsque la caractéristique du produit à mesurer est mesurable), l'instrument de mesure. La norme [ISO 8586-2, 1994] le définit comme étant « *toute personne prenant part à un essai sensoriel* ». Il est en fait l'évaluateur de la caractéristique à mesurer. Le sujet peut être soit naïf, soit entraîné. Tout dépend du type de produit présenté, de la caractéristique à mesurer, du contexte et de l'objectif de la mesure (Annexe 2).

En tenant compte du type d'évaluation à réaliser, un sujet suivra en totalité ou partiellement différentes phases d'entraînement pour atteindre un niveau d'expertise souhaité par l'expérimentateur. La Figure 11 décrit ces différentes étapes.

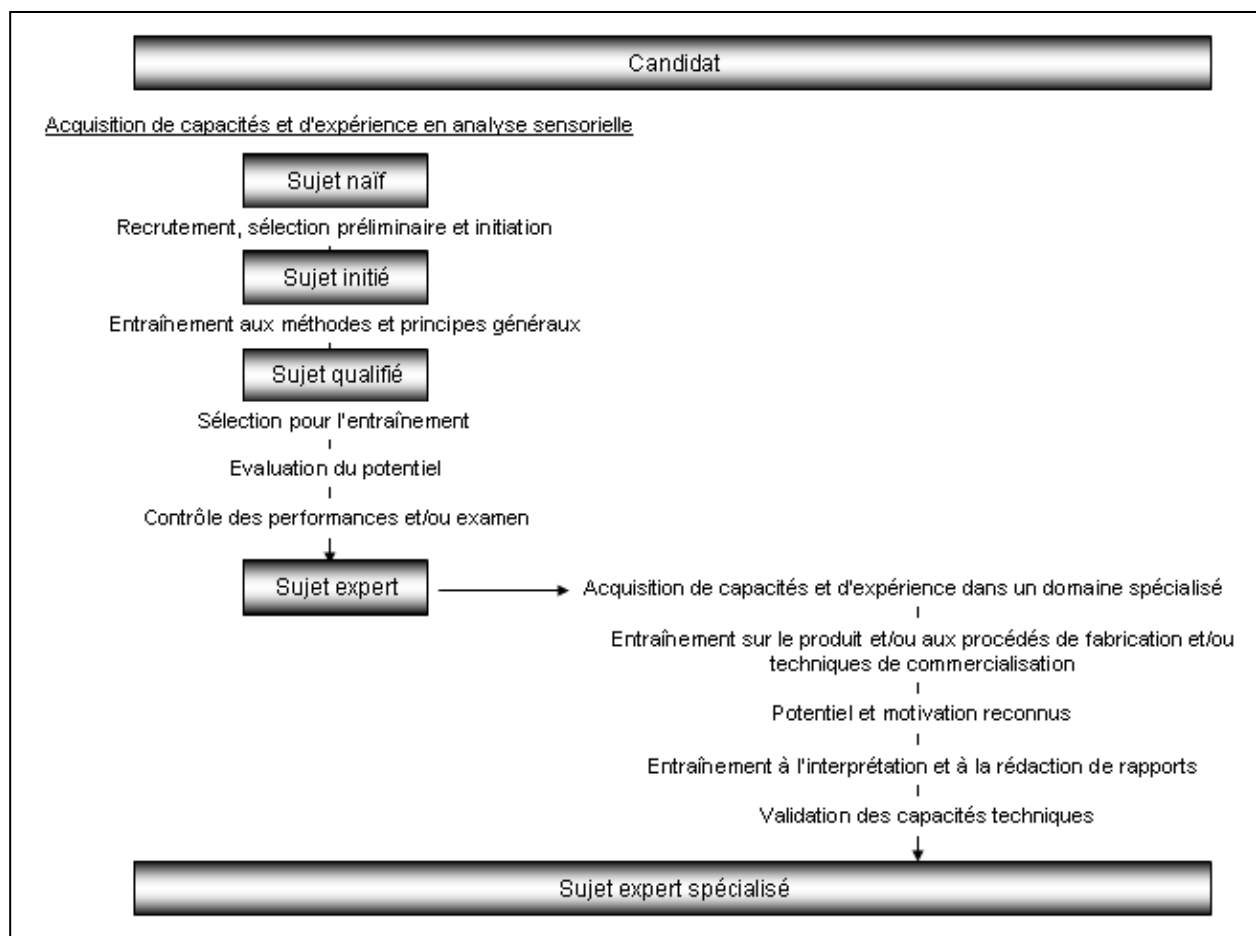


Figure 11 : Les différents types de sujets [ISO 8586-2, 1994]

Cette représentation montre le passage entre les différents niveaux que le sujet peut atteindre : naïf, initié, qualifié et expert.

Dans la norme [ISO 8586-2, 1994], le sujet naïf est défini comme une « *personne ne répondant à aucun critère particulier* », le sujet initié comme une « *personne qui a déjà participé à un essai sensoriel* », le sujet qualifié comme un « *un sujet choisi pour sa capacité à effectuer un essai sensoriel* » et l'expert comme « *la personne qui, par ses connaissances et son expérience, a la compétence requise pour fournir un avis dans les domaines sur lesquels il est consulté* ».

L'analyse sensorielle définit quant à elle deux types d'expert : le sujet expert et le sujet expert spécialisé. Le premier est un sujet qui a un niveau d'expertise tel qu'il est reconnu pour réaliser une analyse sensorielle de façon fiable. Le sujet expert spécialisé détient de plus une connaissance autre que celle du produit (par exemple, son procédé de fabrication, sa technologie et/ou les différents modifications de conception, matériaux, etc.) pouvant induire un changement dans son évaluation.

4.2.1.2 LA PRESENTATION DES ECHANTILLONS

A partir du choix des sujets et suivant la démarche d'analyse sensorielle utilisée, l'expérimentateur choisit ensuite la manière de présenter les échantillons des différents produits. Soit il les présente de manière simultanée soit il les présente de manière successive. Cependant, et afin qu'aucun élément perturbateur venant de l'environnement extérieur ne vienne créer de la variabilité dans la mesure, des cabines d'évaluation

sensorielle sont préconisées le cas échéant. Ces cabines (Figure 12) sont les plus neutres possible (par exemple, toute conversation entre sujets est rendue impossible).



Figure 12 : Locaux du service Evaluation sensorielle du [CTSCCV]

4.2.1.3 LES DESCRIPTEURS

Les sujets expriment ensuite leur perception avec leurs propres mots ou avec des mots proposés par l'expérimentateur. Ces mots sont appelés *descripteurs* puisqu'ils permettent de donner une description précise du produit et de ses caractéristiques. Ils doivent donc répondre à plusieurs critères, comme ceux d'être :

- *pertinents*, c'est-à-dire appropriés au produit.
- *précis*, c'est-à-dire ne pas induire d'ambiguïté lors de leur utilisation pour la compréhension du sujet et de l'expérimentateur.
- *discriminants*, c'est-à-dire être choisis de manière à marquer clairement la différence entre deux produits
- *exhaustifs*, c'est à dire devant décrire l'ensemble du produit en s'attachant à montrer toutes les différences pouvant exister entre tous les produits.
- *Indépendants*, c'est-à-dire ne pas se chevaucher par la description de certains éléments du produit.

4.2.1.4 LES ECHELLES

Chaque descripteur libre ou non peut être lié à une échelle d'intensité permettant de saisir l'importance de la perception du descripteur dans le produit évalué. En fait, cette démarche est la même que lorsqu'un pédiatre demande à un patient d'évaluer sa douleur sur une échelle de un à dix.

L'analyse sensorielle définit trois types d'échelle (Figure 13) :

- échelle de catégorie : cette échelle est composée de catégories définies par des chiffres, mots ou dessins. Elle se compose donc de valeurs soit sémantiques, soit numériques.
- échelle d'intervalles : cette échelle est une échelle de repérage dont l'origine est arbitraire. De plus, les intervalles représentés sur cette échelle tiennent compte de la distance entre l'intensité perçue pour le descripteur donné. Cette échelle d'intervalle peut être soit structurée, soit non structurée.
- échelle proportionnelle : cette échelle représente le rapport entre deux sensations.

Échelle de catégorie

Évaluation de papiers abrasifs

Sémantique	Numérique
-très fin	-000
-fin	-0
-moyen	-1
-gros	-2
-très gros	-3

Échelle non structurée

Évaluation du caractère odeur de menthe pour du gel

Ech. ne présentant pas
d'odeur de menthe

|-----|

Ech. présentant d'odeur de
menthe extrêmement forte

Échelle structurée

Évaluation du caractère sec ou juteux pour de la viande

très sec

sec

ni sec
ni juteux

juteux

très juteux

Échelle proportionnelle

Évaluation du caractère acide pour des yaourts

Évaluez le caractère acide de l'échantillon témoin à l'aide du nombre de leur choix :

Trois yaourt sont ensuite présentés successivement. Pour chacun d'entre eux, attribuez une valeur à l'intensité du caractère acide, proportionnellement à la valeur donnée au témoin.

Échantillon 324

Échantillon 641

Échantillon 298

Figure 13 : Exemples d'échelles en évaluation sensorielle - extrait de [SSHA, 1998]

4.2.1.5 DEMARCHE GLOBALE

La démarche à suivre lors d'une analyse sensorielle est maintenant très éprouvée et a fait l'objet de nombreux articles ([Weller et al., 2002] [Alvelos et al., 2007] [Pérez et al., 2007]). Cette démarche, résumée sur la Figure 14, est composée de plusieurs étapes devant être suivies par l'expérimentateur.

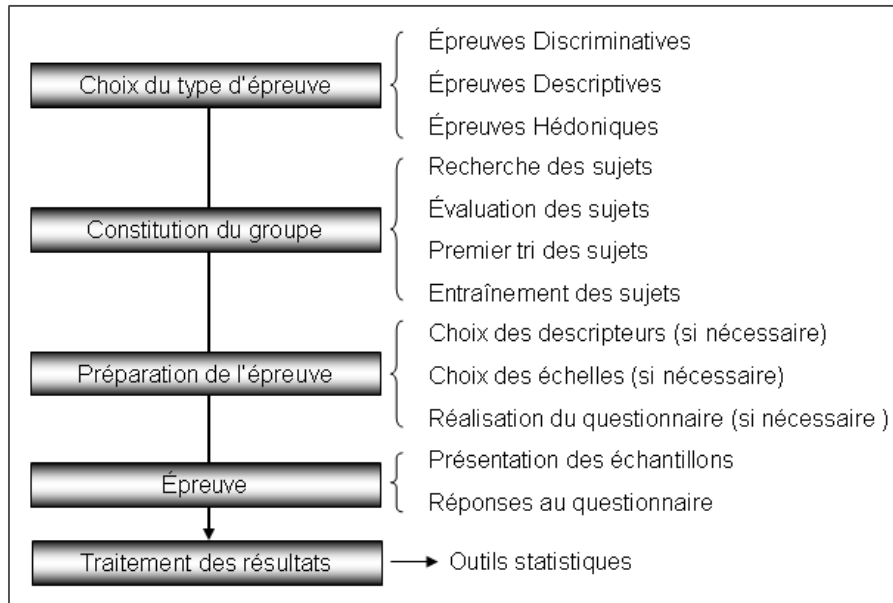


Figure 14 : Les macro étapes de l'analyse sensorielle

Nous détaillons maintenant chacune de ces étapes.

4.2.1.6 LE CHOIX DU TYPE D'ÉPREUVE

Comme dans toute démarche, la première étape est de bien définir le problème et les contraintes pour choisir en connaissance de cause les tests à mettre en place pour atteindre l'objectif (Figure 15). L'objectif d'une analyse sensorielle peut avoir deux applications : soit il s'agit d'étudier les différences entre les produits proposés, soit il s'agit d'étudier leurs préférences. Selon le cas, le type d'épreuve ne sera pas le même (Figure 15).

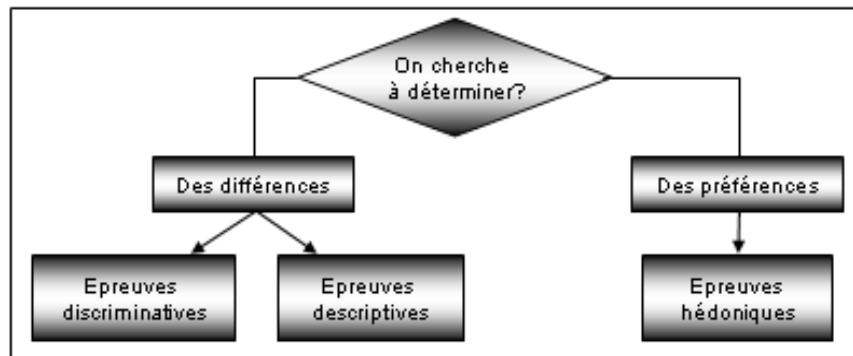


Figure 15 : Choix du type d'épreuves

Nous avons alors le choix entre deux types d'épreuves :

- les épreuves analytiques composées à la fois d'épreuves discriminatives et d'épreuves descriptives qui ont pour but de relever les différences entre les produits en analysant les produits les uns par rapport aux autres
- les épreuves hédoniques qui ont pour but d'étudier les préférences des clients en notant le caractère agréable du produit.

4.2.2 LES EPREUVES ANALYTIQUES

Une épreuve analytique consiste à mesurer les différences entre les produits. Selon que ces différences sont plus ou moins nettes, cette épreuve débouche [SSHA, 1998], soit sur une étude discriminative, soit sur une étude descriptive (Figure 16).

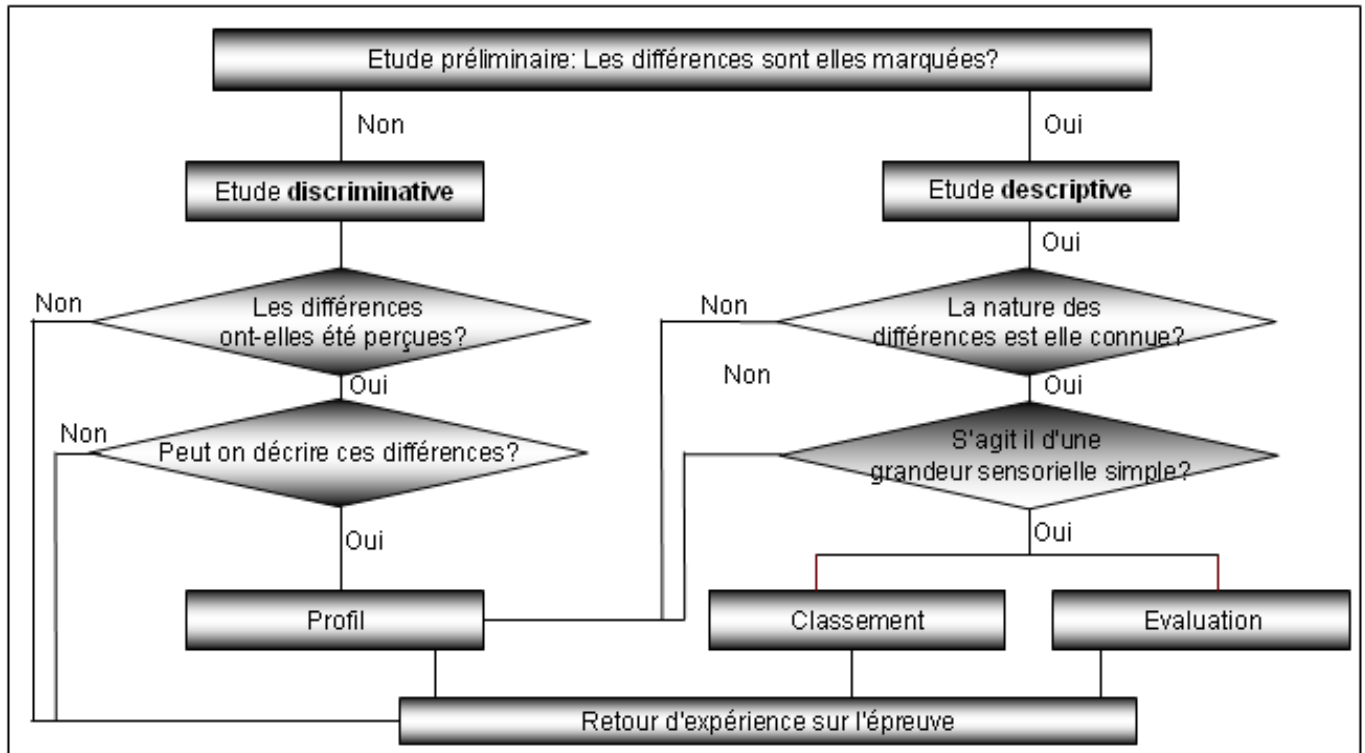


Figure 16 : Choix du type d'épreuves analytiques [SSHA, 1998]

Les études discriminatives permettent d'obtenir le profil du produit. On distingue (Annexe 2):

- Les épreuves d'appariement,
- Les épreuves triangulaires,
- Les épreuves duo trio,
- Les épreuves A-nonA,
- Les épreuves n parmi n.

Les études descriptives permettent d'obtenir, soit un classement des produits les uns par rapport aux autres suivant la composante souhaitée, soit une évaluation de tous les produits.

On distingue par exemple (Annexe 2) :

- Les épreuves de classement,
- Les épreuves de cotation,
- Les épreuves d'intervalle,
- Les épreuves de rapport.

4.2.3 LES EPREUVES HEDONIQUES

Ces épreuves permettent de connaître les préférences entre évaluateurs et donc entre clients. Elles font appel au caractère de satisfaction du client en tenant compte du "j'aime, j'aime pas !". On distingue par exemple (Annexe 2) :

- Les épreuves par pair
- Les épreuves de classement
- Les épreuves de lassitude
- Les épreuves d'aversion
- Les épreuves d'authenticité

- Les épreuves de consommation
- Les épreuves monadiques

4.2.3.1 LA CONSTITUTION DU GROUPE

L'expérimentateur doit constituer son groupe d'évaluateurs en suivant différentes règles qui seront primordiales pour obtenir des résultats concrets et les plus proches de la réalité. Il crée donc son groupe en tenant compte de la disponibilité, de la motivation des personnes ainsi que de l'éventualité qu'ils puissent utiliser le produit de l'évaluation dans leur vie personnelle.

Cette première recherche lui permet de faire un premier tri des sujets, afin de pouvoir commencer à les former à la méthode qu'ils vont devoir suivre, mais aussi afin de les entraîner si nécessaire à l'évaluation qu'ils vont devoir réaliser.

4.2.3.2 LA PREPARATION DE L'EPREUVE

La préparation varie selon le type d'épreuve choisi. En effet, elle consiste à choisir les descripteurs, choisir les échelles, réaliser les questionnaires, préparer les échantillons, etc. en fonction de la démarche adoptée auparavant.

4.2.3.3 LA REALISATION DE L'EPREUVE

Classiquement cette étape se décompose en plusieurs phases résumées dans la Figure 17.

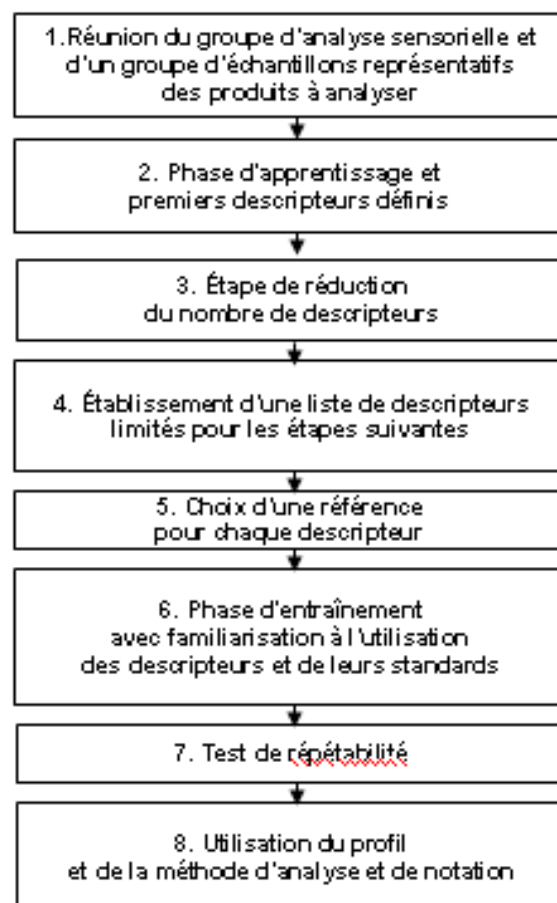


Figure 17 : Les étapes standards d'une analyse sensorielle

Cette démarche est décrite dans de nombreux articles (par exemple dans [Delteil, 2000]). Dans un premier temps (étape1), l'expérimentateur rassemble un groupe d'experts jugé comme le plus à même d'effectuer en totalité et donc de manière cohérente l'ensemble des étapes de la démarche.

Ce groupe d'experts est alors entraîné à regarder, contrôler et évaluer des pièces. De cet entraînement ressort une première description des pièces analysées, celle-ci devant ensuite s'affiner au fil du temps par une meilleure connaissance de la qualité attendue des produits. L'expérimentateur dispose alors d'une liste de descripteurs pertinents, précis, discriminants, exhaustifs et indépendants [Lateur et al., 2001] [SSHA, 1998] (étape 2, 3, 4) réduisant de fait le flou engendré par un vocabulaire propre à chacun des contrôleurs

Ce travail en groupe permet également de régler les conditions d'évaluation de chacun des instruments de mesure (i.e. chaque expert) et, par conséquent, permet de créer une échelle de référence des produits (étape 5).

C'est sur la base de ces résultats (liste exhaustive de descripteurs et référence définie) que les évaluateurs sont ensuite formés à ce nouveau concept. Chaque évaluateur est donc entraîné et contrôlé de manière à éviter toute dérive de jugement et d'apprentissage (étape 6, 7, 8).

4.3 METROLOGIE SENSORIELLE

Cette évaluation subjective rendue possible par la méthode d'analyse sensorielle doit s'inscrire dans une métrologie sensorielle afin de rendre la mesure répétable et reproductible dans le temps.

4.3.1 DEFINITION DE LA METROLOGIE

La métrologie peut se définir comme étant « *la science de la mesure associée à l'évaluation de son incertitude* » [Cotteret, 2006]. La spécificité de la discipline métrologique n'est pas dans la mesure elle-même, mais dans la validation du résultat.

La métrologie est une composante essentielle de la qualité puisqu'elle constitue l'un de ses trois piliers institutionnels (normalisation, certification, métrologie).

La métrologie a toujours apporté tout son savoir-faire à la qualité. Elle apparaît dans toute démarche de certification, que ce soit du produit ou du système d'assurance qualité.

De nos jours, il n'est plus seulement question de réaliser le meilleur produit ou service, il faut d'une part obtenir la pérennité du niveau de qualité convenu et, d'autre part, le garantir à ses clients.

Un client, quel qu'il soit, exige deux éléments importants :

- la qualité du produit, dont il attend d'être satisfait,
- l'assurance de la qualité de l'entreprise dans laquelle il attend d'avoir confiance et qu'elle rende sûre l'obtention de la qualité du produit.

Dans les deux cas, les équipements de mesure sont des points de passage obligés :

- point de passage pour l'obtention de la qualité du produit [ISO 9004, 2000],
- point de passage pour la maîtrise des équipements de mesure [ISO 9001, 2000] [ISO 9002, 2000] ou [ISO 10012, 2003].

L'expression objective de la qualité repose essentiellement sur des mesures dont les références sont indiscutables. Il faut donc que toute mesure soit significative, qu'elle ait le même sens partout et pour tous, hier, aujourd'hui et demain. Dans ce sens, on trouve dans toutes les normes relatives à la qualité, des exigences concernant le raccordement aux étalons nationaux.

La métrologie joue donc un rôle important à tous les stades de la démarche qualité, par ses aspects réglementaires et contractuels.

4.3.2 DEFINITION DE LA METROLOGIE SENSORIELLE

Curieusement, il n'existe pas véritablement de réel consensus sur la définition de la métrologie sensorielle. L'unique définition sur laquelle nous avons pu nous baser est celle fournie par le Ministère de l'Industrie [ING, 1997] : *"ensemble de méthodes, d'outils et d'instruments qui permettent d'évaluer les qualités organoleptiques d'un produit, c'est-à-dire les caractéristiques faisant intervenir les organes des sens de l'être humain : le goût, l'odorat, la vue, le toucher et l'ouïe"*.

La métrologie permet de donner une mesure à un mesurande qui n'est pas mesurable quantitativement. Elle vise donc à mieux cerner les perceptions et les évaluations subjectives du sujet et à les objectiver en les corrélant avec des propriétés physiques mesurables sur le produit fini ou en cours de fabrication.

Cette notion a surtout été développée dans les années 70, particulièrement dans le secteur de l'agro-alimentaire lorsque le marché de consommation a évolué pour prendre en considération les attentes des clients et non plus des données purement nutritionnelles ou/et physico-chimiques. L'optique des entreprises s'est donc totalement inversée en voulant comprendre ce qui amène les clients à acheter un produit plutôt qu'un autre. Des études ont donc été et sont encore menées en ce sens comme par exemple celles effectuées dans le domaine viticole [Sauvageot et al., 2005] [Alvelos et al., 2007] ou des laitages [Mojet et al., 2005]. Nous comprenons alors bien l'importance de cette métrologie au niveau de la conception de produit dans le but de répondre totalement aux besoins du client. Il faut tout de même préciser que lorsque l'on parle de perception client, celle-ci ne fait qu'évoluer en fonction des différentes modes, ce qui provoque une incessante remise en question des critères définis pour satisfaire le client.

4.3.3 LES DOMAINES D'APPLICATION DE LA METROLOGIE SENSORIELLE

Ces domaines d'application de la métrologie sensorielle peuvent être classés en trois familles (Figure 18) [Eurofins, 2006] :

- le marketing,
- la recherche & développement,
- le contrôle qualité.

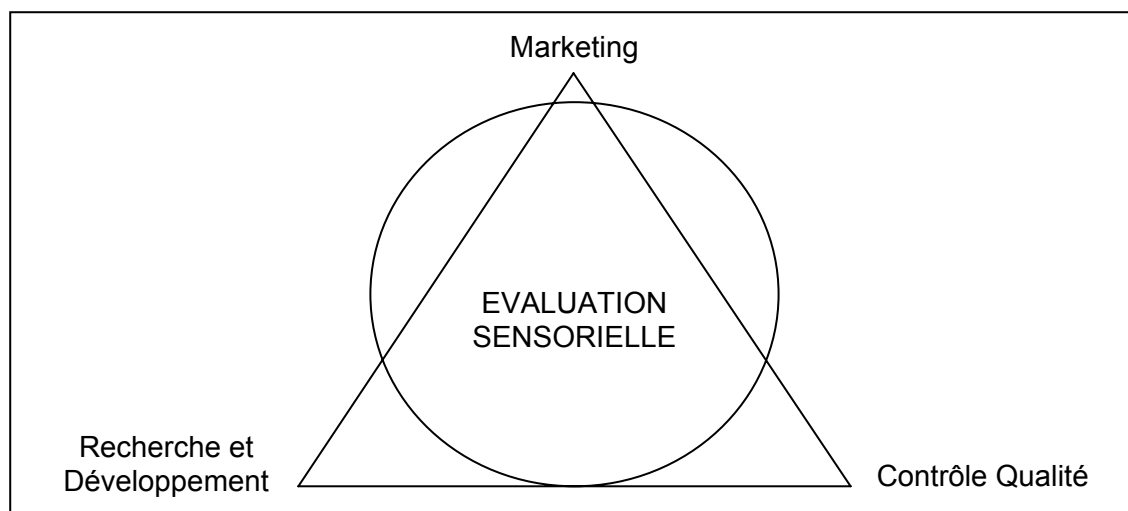


Figure 18 : Domaines d'application de la métrologie sensorielle

4.3.3.1 LA RECHERCHE & DEVELOPPEMENT

L'évaluation sensorielle intervient lors de la mise au point de nouveaux produits. Des sujets qualifiés et entraînés sont sollicités pour décrire objectivement les échantillons et évaluer les ressemblances ou dissemblances entre différentes références d'un même type de produit. Ces études permettent de comparer différentes formulations, d'améliorer un produit, d'évaluer l'incidence d'une modification de processus sur les qualités sensorielles du produit.

4.3.3.2 LE MARKETING

Le marketing garantit l'activité commerciale des industries en explicitant le besoin et les attentes du marché. Il mène des études de marché qui tiennent compte du besoin, des

attentes, des remarques, des attitudes des consommateurs vis-à-vis du produit. L'objectif premier en terme de marketing est de toucher la sensibilité du consommateur pour assurer, voire même développer, la part de leur marché au niveau de leur clientèle.

En terme de marketing, la perception du client est de nos jours mise en avant en utilisant la métrologie sensorielle pour maîtriser l'évaluation subjective qu'ils se font du produit qui leur est présenté. Dans ce cas, les études consommateurs viennent valider les études effectuées en Recherche & Développement et mettre en évidence les axes d'amélioration des produits. Elle permet aussi de mesurer l'influence ou de valider la marque, la dénomination, le packaging, ou le prix du produit.

Nous pouvons nous permettre de considérer que ce domaine représente la majeure partie des analyses sensorielles menées à l'heure actuelle, en listant rapidement le nom des entreprises qui l'utilisent en ce sens : L'Oréal [Loréal, 2005], PSA Peugeot Citroën [Fritsch, 2001], Renault [Nesa et al., 2004], Nestlé [Nestlé, 2003]...

4.3.3.3 LE CONTROLE QUALITE

Le contrôle qualité garantit le respect du cahier des charges. Des contrôles sont donc effectués tout au long du flux de production pour s'assurer de la bonne conformité des produits d'une étape à une autre de la gamme afin de satisfaire le client final.

Dans ce cas précis, et c'est ce qui change par rapport aux autres domaines, l'analyse sensorielle est basée sur la perception du contrôleur et non sur celle du client potentiel. Notons que, bien sûr, le contrôleur sera formé selon les attentes du client mais aura malheureusement sa propre sensibilité qui influencera l'analyse.

4.3.3.4 L'IMPORTANCE DE CES DOMAINES DANS L'UTILISATION DE LA METROLOGIE SENSORIELLE

La métrologie sensorielle définie comme précédemment constitue une aide précieuse dans la conception d'un produit, ce qui représente la majeure partie de son application dans un contexte industriel. Elle a été identifiée par le Ministère de l'industrie dans le rapport des technologies clés, à l'horizon de 2005 étant une aide pour :

- l'analyse des besoins et des comportements des consommateurs,
- la prise en compte de la dimension humaine en conception de produit.

Classée par le ministère dans le cadre des technologies organisationnelles et d'accompagnement, la métrologie sensorielle est employée surtout dans le domaine du marketing et de la recherche et du développement. L'étude de la métrologie sensorielle dans un contexte de contrôle qualité est rare et son utilisation peu répandue.

Nous avons cherché à savoir quelle était la répartition des publications entre 1988 et 2008 parlant d'évaluation sensorielle (le terme métrologie sensorielle étant encore que très rarement employé) et suivant le domaine étudié : Recherche et développement, Marketing et Contrôle qualité. La Figure 19 donne les résultats de cette étude.

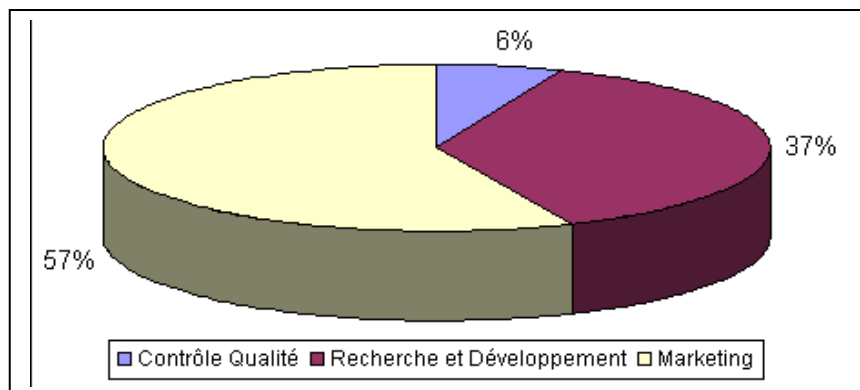


Figure 19 : Répartition des domaines d'application de l'évaluation sensorielle

5 CONCLUSION

L'objectif de ce chapitre était de présenter l'ensemble des notions théoriques associées à la problématique d'un contrôle visuel des produits. Aussi et ce fut notre ligne de conduite dans ce chapitre, nous avons expliqué une à une ces notions en cherchant néanmoins à montrer le lien que l'on pouvait faire entre elles. Ce lien est donc le fil conducteur de l'ensemble de nos propositions que nous allons réaliser dans ce mémoire.

Ce mémoire devra donc répondre à notre problématique : obtenir la qualité recherchée en tenant compte à la fois des exigences clients mais aussi de celles de l'entreprise en réduisant la dispersion des mesures obtenues par un contrôle qualité subjectif.

Dans ce chapitre, nous avons donc défini la notion de qualité dans un contexte industriel. Ce contexte étant bien spécifique, nous avons insisté sur la réalisation d'un contrôle qualité basé sur une part de subjectivité importante dans les mesures effectuées.

De ce constat, nous avons donc trouvé judicieux d'expliquer l'ensemble des contrôles spécifiques faisant intervenir un aspect subjectif. Ces contrôles font alors principalement intervenir comme instrument de mesure : l'humain. Ils utilisent par conséquent ses principaux outils : le goût, l'odorat, l'audition, le toucher et le visuel.

La conséquence de ces contrôles, tels que nous les avons décrit, est que l'évaluation de la qualité d'une pièce lors de son contrôle paraît alors être une évaluation principalement subjective.

Cette subjectivité est la base de certaines méthodes comme l'Analyse sensorielle, qui l'a prene en considération. Or même si le lien entre le contrôle qualité et l'analyse sensorielle est très rarement fait dans la littérature et/ou dans les entreprises, cette association les outils et méthodes de l'analyse sensorielle et le contrôle visuel des produits dans une entreprise peut contribuer à améliorer la subjectivité des mesures réalisées jusqu'à maintenant.

Ce cheminement d'idées amène donc à penser que le contrôle qualité que nous avons décrit est en réalité un contrôle sensoriel. Or pour beaucoup de personnes, un contrôle sous tend l'idée d'une mesure à effectuer. Pour un enfant par exemple, le "*contrôle*" se réfère à l'interrogation écrite qui lui donnera une note et qui aura pour finalité de s'assurer s'il a compris ou non la leçon. Parler alors de *Contrôle* sur un aspect qui ne peut pas être mesuré peut donc sembler au premier abord totalement aberrant ! Et si nous rajoutons à cela un aspect métrologique, il faut s'attendre à la surprise générale !

Cependant, et c'était le but de ce chapitre, le fait de définir l'ensemble des termes et concepts relatifs à un contrôle visuel (mesure, qualité, subjectivité, instrument de mesure, stimulus, ...) nous a permis de mieux appréhender les spécificités et les contraintes du non mesurable dans un contrôle qualité.

Dans le chapitre suivant, notre objectif sera, en nous basant sur ces termes et concepts, de proposer une démarche permettant d'effectuer ce contrôle avec l'objectif de réduire autant que possible la variabilité des résultats délivrés par ce contrôle. Nous décrirons alors une démarche générique permettant de réaliser un contrôle sensoriel et d'arriver au but de ce dernier : donner un jugement le moins subjectif possible lors de l'évaluation d'un produit. Aussi, par cette démarche, le lien entre un contrôle visuel des produits et l'analyse sensorielle semble alors tout à fait naturel.

Le jugement du produit suivra donc un processus faisant intervenir entre autre les concepts de l'évaluation subjective que nous avons défini. La description de ce processus de contrôle sensoriel sera alors le principal objectif du chapitre 2.

Chapitre 2

Réduire la variabilité de l'évaluation humaine par l'Analyse Sensorielle

1 INTRODUCTION

Précédemment, nous avons montré les contraintes et les conséquences d'une évaluation humaine lors d'un jugement sur un produit considéré. Nous nous sommes demandés quels étaient les enjeux et les difficultés d'une évaluation humaine, mais aussi, quelles étaient dans la littérature les diverses méthodes qui pouvaient rendre cette évaluation la moins subjective possible.

Le chapitre 1 nous a donc permis de réfléchir à ces questions et de lister les différents éléments susceptibles d'y répondre comme *l'Evaluation subjective*, *l'Analyse sensorielle*...

L'objectif de ce chapitre est donc de proposer une démarche générique contribuant à la formalisation d'un jugement subjectif lors de l'évaluation d'un produit quelconque.

Le processus qui conduit à la décision d'acceptation ou de refus d'un produit est complexe. Une première contribution consistera à analyser ce processus pour aboutir à la proposition d'une segmentation de ce processus en dissociant trois étapes : L'Exploration, l'Evaluation et la Décision.

L'Exploration reprend donc la perception à la fois globale mais aussi partielle de chaque élément composant le produit. Concernant cette première étape, notre objectif est d'améliorer la perception des anomalies et ceci dans le but de simplifier et de fiabiliser l'étape d'Evaluation qui suivra. Nous proposerons ainsi de réduire la variabilité pouvant intervenir lors de la perception en mettant en place les moyens de supprimer les sources de perturbations issues des 5 M (Milieu, Méthodes, Matière, Machine et Main d'œuvre).

L'étape d'Evaluation permet de quantifier le produit. Pour cette étape, notre objectif est de parvenir à une standardisation de l'évaluation humaine de manière à réduire sa variabilité. Cette standardisation se base sur les méthodes d'Analyse sensorielle : description du produit la plus pertinente possible en utilisant des descripteurs, puis notation du produit en utilisant une échelle sémantique d'intensité de la perception.

La Décision est la conséquence des deux autres étapes. C'est le résultat final. Elle donne donc un point final à la démarche d'évaluation..

Faire le lien entre un contrôle visuel des produits et l'analyse sensorielle semble naturel et paraît, au moins à première vue, relativement simple à faire. La littérature n'évoque pourtant que très rarement ce rapprochement. Comme nous avons pu le voir précédemment, l'analyse sensorielle est une méthode très utilisée en marketing, mais son application dans le domaine du contrôle qualité reste encore très limitée.

Maîtriser la qualité du produit signifie maîtriser son processus de fabrication et, par conséquent, maîtriser les risques induits par cette fabrication. La démarche que nous proposons dans ce chapitre s'inscrit également dans cette optique : utiliser l'analyse sensorielle pour construire une démarche de contrôle afin de rendre mesurables des anomalies qui, par nature, ne le sont pas.

Celle-ci se base bien sûr sur des approches classiquement utilisées lorsque cette analyse sensorielle est appliquée dans le domaine du marketing, mais notre travail a consisté à l'adapter pour une application au contrôle qualité.

Ce chapitre détaille donc les différentes étapes de la démarche générique que nous proposons et montre (en italique dans le texte) comment nous l'avons appliquée).

2 ELABORATION DE LA DEMARCHE

L'Analyse Sensorielle est aujourd'hui un standard pour traduire une perception sensorielle sur la qualité d'un produit. Notre démarche de recherche a consisté à adapter ce standard, actuellement très centré sur la recherche de l'avis du consommateur, au contexte de notre étude.

2.1.1 LE PDCA

Pour structurer une démarche de progrès, l'approche d'une décomposition suivant la roue de Deming est très souvent utilisée [Deming, 1982]. Ce modèle d'amélioration présenté en 1950 est actuellement très appliqué. L'approche utilisée propose de structurer la démarche selon un cycle PDCA (Figure 20) regroupant quatre phases, chacune d'elles entraînant la suivante :

- la phase Plan (P) : elle est la phase la plus importante et consiste à préparer un changement ou une amélioration. Cette phase permet donc de lister toutes les propriétés ou les contraintes de la démarche.
- la phase Do (D) : elle correspond à la construction proprement dite du changement ou de l'amélioration.
- la phase Check (C) : elle consiste à vérifier que la construction (D) correspond effectivement à ce qui était prévu (P).
- la phase Act (A) : elle contribue à standardiser le changement ou l'amélioration en généralisant les solutions mises en place.

L'enchaînement de ces quatre phases se poursuit par la définition, symbolisée par la cale, de nouvelles procédures et/ou spécifications visant à consolider le changement ou l'amélioration symbolisée par une cale sur la Figure 20.

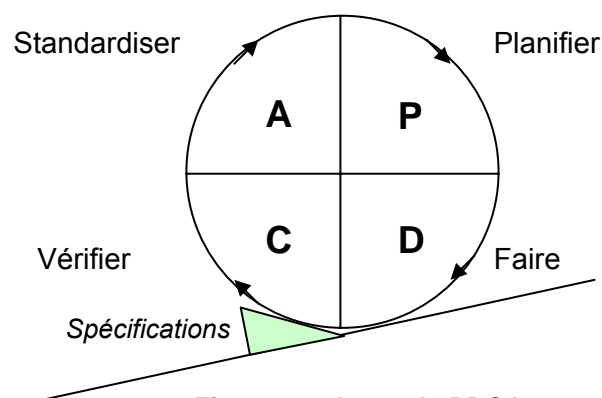


Figure 20 : Le cycle PDCA

2.1.2 L'ANALOGIE A NOTRE DEMARCHE

Nous avons choisi de nous baser sur ce modèle de structuration pour définir et mettre au point la démarche que nous proposons. En utilisant des termes plus appropriés à notre cas, les phases classiques du cycle PDCA sont ainsi devenues celles d'un cycle PCVU avec :

- la phase Préparation (P) : elle consiste à définir toutes les contraintes et les propriétés de l'élaboration de la démarche.

- la phase Construction (C) : elle correspond à la construction proprement dite de la méthode à mettre en œuvre.
- la phase Validation (V) : elle représente la phase de test qui valide ou non la méthode en vérifiant qu'elle délivre une réponse cohérente avec les objectifs et les moyens fixés au départ.
- la phase Utilisation (U) : elle vise à développer des solutions et améliorations permettant de généraliser la méthode.

2.1.3 NOTRE PROPOSITION

Pour détailler les différentes étapes composant chacune de ces quatre phases, nous nous sommes ensuite inspirés des travaux menés dans le domaine de l'analyse sensorielle visant à montrer comment étudier de manière ordonnée et structurée les propriétés d'un produit dans le but de le décrire, le classer ou l'améliorer. Néanmoins, plutôt que de segmenter les étapes et les rendre indépendantes pour obtenir une démarche « pas à pas », nous proposons que certaines étapes puissent être réalisées simultanément. Cette simultanéité permet en effet de ne pas perdre d'information sur le produit et le processus. .

La Figure 21 présente cette nouvelle démarche qui est décomposée en quatre phases : la préparation, la construction, la validation et l'utilisation. Ces phases représentent donc des jalons intermédiaires à l'élaboration de la démarche.

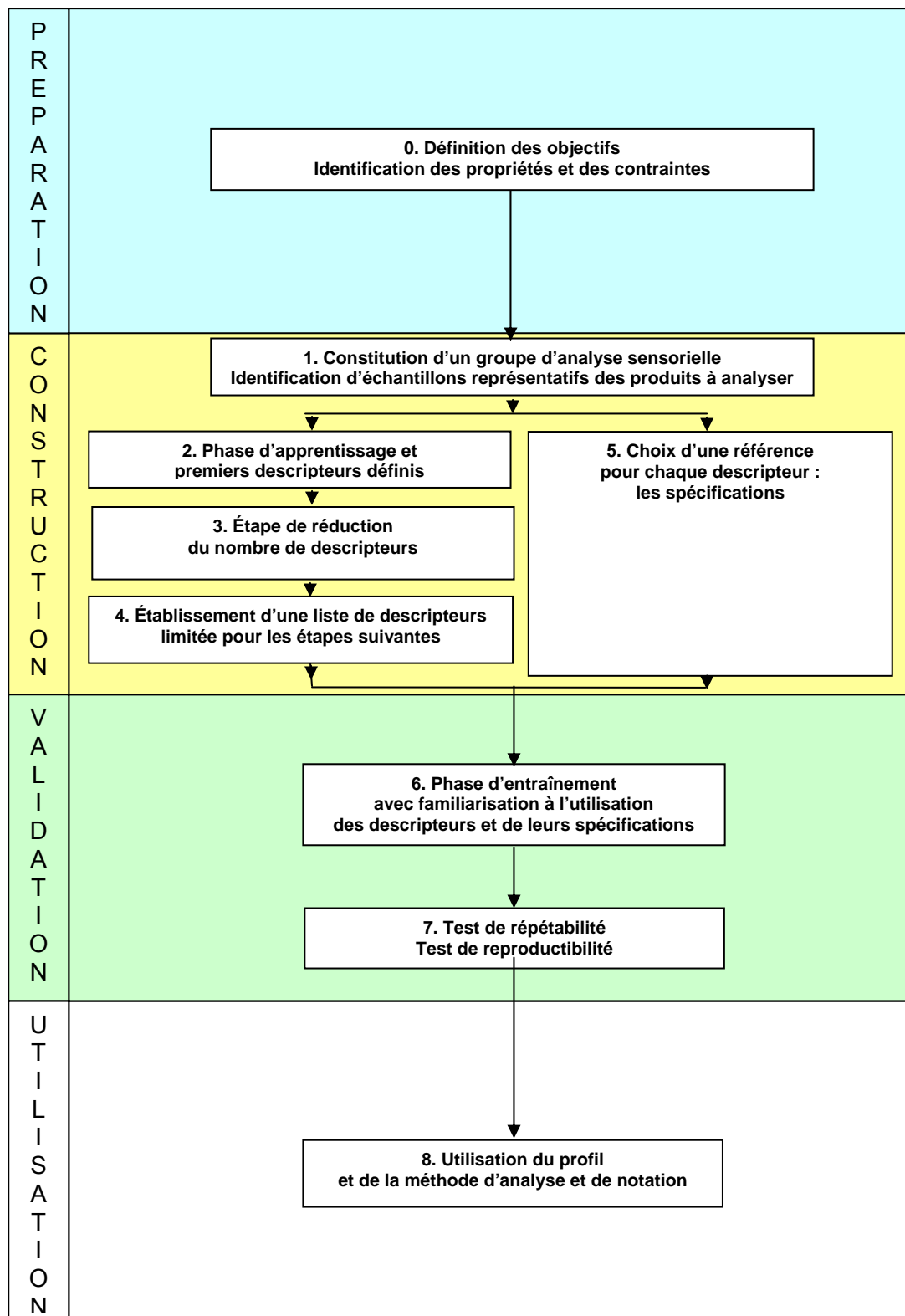


Figure 21 : Etapes de l'analyse sensorielle réalisée pour l'élaboration de la démarche

La phase Préparation comprend une seule étape (étape 0) qui vise à définir les objectifs de la démarche ainsi que les propriétés et contraintes à prendre en compte par la méthode. Bien évidemment, cette étape est déterminante pour s'assurer que la méthode qui sera

élaborée sera en cohérence avec les contraintes existantes et les moyens qui seront mis à disposition.

La phase Construction est celle qui, logiquement, a le plus grand nombre d'étapes. Ce sont les étapes préconisées par l'analyse sensorielle. Cependant, sans modifier radicalement l'ordre des étapes, nous proposons de réaliser l'étape 5 en parallèle des étapes 2, 3 et 4. Dans un premier temps, un groupe de personnes est créé et réuni et un échantillon de produits représentatifs est déterminé. Ces personnes sont des experts métiers connaissant le processus d'obtention du produit et spécialistes d'un domaine de fabrication de ce produit. La deuxième étape consiste à entraîner les membres de ce groupe afin de les rendre experts en analyse sensorielle. Ils vont donc être entraînés à évaluer des produits en utilisant une échelle d'intensité laissée libre pour chacun d'entre eux et commencer, par conséquent, à lister des descripteurs se référant à ce qu'ils ressentent. L'étape qui suit est une étape de réduction de cette liste de descripteurs. L'étape 4 sera donc une étape de validation de cette liste de descripteurs. A partir de cette étape, les experts utiliseront exclusivement cette liste lorsqu'il s'agira d'évaluer les produits présentés. En parallèle de ces trois étapes, nous proposons de réaliser l'étape 5 qui consiste à définir un choix de référence pour chaque descripteur listé. Commencer cette étape suffisamment tôt dans la construction de la démarche permet de fixer les spécifications du produit et donc de gagner un maximum d'informations en créant ces spécifications avant même de définir la liste finale de descripteurs. A la fin de cette phase de construction, les livrables incluent donc la liste finale de descripteurs et les spécifications de chacun de ces descripteurs.

La phase Validation regroupe deux étapes (étape 6 et 7), la première visant à former les experts à l'utilisation de la méthode et la seconde permettant de valider cet apprentissage par un test de répétabilité et de reproductibilité.

L'unique étape de la phase Utilisation met en application la méthode dans le contexte et avec les objectifs définis lors de la phase Préparation.

Nous détaillons maintenant ces quatre étapes et les différentes phases les composant.

2.2 PHASE 1 : LA PREPARATION DE LA DEMARCHE

L'élaboration d'une méthode de contrôle visuel des produits passe par une définition précise de l'objectif qualité qui est visé ainsi que par la prise en compte des propriétés des produits et des contraintes associées au contrôle de ces produits. Comme nous avons pu le voir dans le chapitre 1, cela suppose, d'une part, de connaître, quitte à la redéfinir, la cible qualité à viser et, d'autre part, de maîtriser le processus pour atteindre cette cible. Ces deux aspects doivent donc être pris en considération pour élaborer la méthode de contrôle visuel des produits la plus adéquate. C'est l'objet de l'étape de Préparation.

Dans notre cas cependant, nous n'abordons pas la question de la définition ou la redéfinition de la cible qualité. Celle-ci est en effet aujourd'hui très en accord avec les attentes des clients. Ce choix se justifie par le nombre insignifiant de retours clients actuellement constatés pour des problèmes d'aspect sur les produits, ainsi que sur l'excellente image de marque dont bénéficie aujourd'hui l'entreprise auprès de l'ensemble de ses clients. En revanche, ce niveau qualité est pour l'instant détenu de manière généralement implicite par plusieurs experts. Un travail de formalisation de la référence qualité doit être mené afin que celle-ci puisse être partagée et comprise par l'ensemble des personnes chargées du contrôle des produits.

Par contre, le processus permettant d'atteindre ce niveau de qualité doit être remis en cause. Les contrôles sont aujourd'hui présents à tous les stades de fabrication des produits et sont très, voire trop, nombreux. Le coût que représentent tous ces contrôles est actuellement très important et nécessite d'être réduit. Il en est de même en ce qui concerne le coût des opérations de retouche qui sont réalisées sur les produits présentant au moment de leur contrôle une anomalie. Une retouche représente en effet un coût significatif, surtout si l'on considère que cette retouche peut elle-même être à l'origine de l'apparition de nouvelles anomalies sur ce produit, impliquant ainsi de nouvelles opérations de retouche sur ce produit. A cela s'ajoute un temps de travail supplémentaire qui augmente nécessairement le délai d'obtention des produits. Chaque retouche réalisée est-elle toujours justifiée ? Autrement dit, le processus permettant d'atteindre le niveau de qualité visé est-il convenablement maîtrisé ?

La méthode de contrôle doit pouvoir intégrer la maîtrise du processus permettant d'atteindre la cible qualité définie. Pour cela, il s'agit d'impliquer pour l'élaboration de la méthode l'ensemble des personnes qui sont en contact avec la réalisation des produits. Cette contrainte est essentielle pour développer une synergie avec l'ensemble des corps de métier intervenant dans les différents stades de réalisation des produits. Cela suppose, comme le préconise l'analyse sensorielle [ISO 8586-2, 1994], de constituer un groupe d'experts, spécialistes dans leur domaine, et couvrant la totalité du processus de fabrication des produits.

Cette première étape doit aboutir à la constitution d'un groupe d'experts qui soient représentatifs de l'ensemble du processus de fabrication des produits et ayant en charge d'explicitier le niveau de qualité à atteindre. Ce niveau doit être compatible avec les contraintes admissibles en termes de coût et de délai ainsi qu'avec les caractéristiques spécifiques des produits.

2.3 PHASE 2 : LA CONSTRUCTION DE LA DEMARCHE

Afin de mieux exposer les principes de la démarche que nous proposons, nous avons choisi d'illustrer notre proposition avec la présentation de la construction de cette démarche réalisée dans l'entreprise avec laquelle nous avons collaboré (en *italique* dans le texte)

2.3.1 ETAPE 1 : CONSTITUTION D'UN GROUPE D'ANALYSE SENSORIELLE ET IDENTIFICATION D'UN ECHANTILLON DE PRODUITS

2.3.1.1 CONSTITUTION DU GROUPE

Afin de suivre la démarche prescrite, un groupe de travail doit être constitué. Ce groupe doit être composé de personnes venant si possible d'horizons différents et considérées comme des experts dans leurs domaines respectifs (la notion d'expert étant conforme à celle proposée par la norme ISO qui définit un expert comme « *a person who, through knowledge or experience, has to give an opinion in the fields about which he/she is consulted* » [ISO 5492, 1992]). Il s'agit donc durant cette étape de bien définir le contexte de l'étude pour définir correctement le profil des membres du groupe. Celui-ci pourra donc être considéré comme représentatif de l'ensemble des sujets concernés par l'élaboration de la démarche.

En tenant compte des spécificités de notre problématique, le contrôle visuel des produits, un groupe de travail a été constitué. Ce groupe était composé de personnes ayant des rôles très différents (fabrication, contrôle...) et toutes considérées comme des experts du contrôle qualité visuel des produits.

2.3.1.2 PHASE PRELIMINAIRE

Cette phase préliminaire est une phase importante puisqu'elle doit permettre au groupe constitué de produire des décisions cohérentes. Chaque membre est donc amené à juger séparément les produits présentés en donnant un avis totalement personnel. Utilisant les notions de l'analyse sensorielle, le vocabulaire est totalement laissé libre au sujet lui permettant d'exprimer son propre ressenti. Cette première phase, nommée phase préliminaire, est très importante car, au fil des évaluations, le ressenti de chacun des sujets va se transformer en un ressenti global, et donc en un ressenti de groupe.

Lors des premières réunions, le groupe a rapidement ressenti le besoin de définir des zones et, parfois, des sous zones des pièces à analyser. Cette action a été jugée comme importante de manière à ce que le groupe puisse parvenir à utiliser un vocabulaire commun concernant la terminologie de description et d'évaluation des produits.

Pendant plusieurs mois, les membres du groupe ont été entraînés à évaluer des produits en donnant dans un premier temps un jugement personnel. Lors des séances d'entraînement, les jugements se sont ensuite affinés pour converger vers une seule et même vision du niveau de qualité à viser.

2.3.2 ETAPE 2 : PREMIERS DESCRIPTEURS DEFINIS

Cette étape a pour objectif de finaliser une première liste de descripteurs permettant à la fois de décrire le produit et également de hiérarchiser cette description en donnant une échelle d'importance à ces descripteurs

Chaque personne du groupe a donc face à elle plusieurs produits à évaluer et un formulaire à remplir (Figure 22).

Nom :
Prénom :
Date :

Consigne : Pour chaque produit, il vous est demandé de le décrire par un ou plusieurs descripteurs, d'associer à chacun de ces descripteurs une intensité de 1 à 6 (vous donnerez un mot justifiant pour vous cette intensité).

	Descripteurs	Intensités ressenties de 1 à 6	Mots décrivant l'intensité donnée
Produit 1			
Produit 2			
...			

Figure 22 : Formulaire à remplir par chaque membre du groupe

Le but de cette étape est donc d'obtenir pour chaque descripteur donné une échelle d'intensité structurée qui soit à la fois numérique mais aussi sémantique (Figure 23).

	Intensités	Termes associés
Descripteur 1	1	...
	2	
	3	
	4	
	5	
	6	
Descripteur ...	1	
	...	

Figure 23 : Construction de l'échelle d'intensité pour chaque descripteur

Pour réaliser cette étape, 7 sujets du groupe d'experts ont été choisis pour évaluer un échantillon de 30 produits différents. Lors de l'observation d'une anomalie, chaque expert donnait une expression de cette anomalie, i.e. un descripteur, et une intensité à ce descripteur (valeur comprise entre 1 et 6). A cette intensité, chaque expert avait également comme tâche d'associer librement un mot ou un groupe de mots. Ce vocabulaire associé devait selon l'expert venir compléter son expertise de l'anomalie perçue. Au total, ce sont 31 descripteurs qui ont été utilisés pour décrire les différentes anomalies perçues sur ces produits (Tableau 2).

Raie	Fraie	Rayure	Bulle
Déformation	Particule	Tâche	Soudure
Piqûre de soudage	Sale	Colle	Vis
Défaut de forme	Pore apparent	Variation de couleur	Trop mince
Brillance	Pigmentation	Etat surface pas net	Patate
Porosité	Point	Marque	Noir
Poil	Coup	Point noir	Egrisure
Petite marque	Fond coupant	Résidu	

Tableau 2 : Première liste des descripteurs

2.3.3 ETAPE 5 : DEFINITION DES SPECIFICATIONS

Cette étape 5 est l'étape qui permet de définir les spécifications. Bien souvent présentée comme la dernière étape de la phase de construction, nous proposons quant à nous de la réaliser en parallèle de toutes les étapes de cette phase. Notre but est en effet, d'une part de ne pas perdre d'information sur le savoir faire du groupe constitué, et d'autre part, d'utiliser la démarche d'évaluation proposée pour constituer une base de données sur l'acceptabilité des produits.

Il est alors demandé au sujet ayant répondu au formulaire proposé (Figure 22) de donner son avis sur l'acceptabilité du descripteur mais aussi du produit. Nous proposons donc que le formulaire initial (Figure 22) soit complété de la manière suivante (Figure 24) :

Nom : Prénom : Date :					
Consigne : Pour chaque produit, il vous est demandé de le décrire par un ou plusieurs descripteurs, d'associer à chacun de ces descripteurs une intensité de 1 à 6 (vous donnerez un mot justifiant pour vous cette intensité). Pour terminer, il vous est demandé, selon votre propre ressenti, de juger de l'acceptabilité de chaque descripteur que vous avez cité et de juger de l'acceptabilité du produit lui-même.					
	Descripteurs	Intensités ressenties de 1 à 6	Mots décrivant l'intensité donnée	Acceptabilité du descripteur : Oui / Non	Acceptabilité du produit : Oui / Non
Produit 1					
Produit 2					
...					

Figure 24 : Formulaire à remplir pour l'évaluation et le jugement des produits lors de la phase 2

Il est apparu rapidement qu'il fallait très vite construire les spécifications pour ne pas perdre d'informations (étape 5) durant l'étape d'apprentissage du groupe.

Nous avons donc demandé à chaque personne du groupe de définir, de manière personnelle, l'anomalie, la zone de l'anomalie, l'intensité des anomalies perçues par une valeur comprise entre 1 à 6. Après chaque évaluation, il a ensuite été demandé aux experts de préciser s'ils jugeaient l'anomalie acceptable ou non.

Chaque expert a donc fait part de sa propre échelle des valeurs d'intensité. Nous avons remarqué que, et cela sans que l'expérimentateur impose de règles sur cette échelle, chaque expert définissait généralement le niveau 3 comme le niveau litigieux entre l'acceptabilité ou le refus de la pièce.

Le groupe, à ce stade en parfaite synergie sur le niveau qualité à viser après la réalisation de l'étape 1, a créé ses spécifications en combinant à la fois :

- le type d'anomalie
- l'intensité de l'anomalie
- la zone de l'anomalie

et en associant un jugement : acceptable ou non acceptable.

2.3.4 ETAPE 3 : REDUCTION DES DESCRIPTEURS

2.3.4.1 1ERE REDUCTION

Cette première réduction est, le cas échéant, une réduction que l'on peut qualifier de logique. En effet, après avoir mis en commun tous les formulaires remplis par les membres du

groupe et après avoir listé l'ensemble des descripteurs proposés, un premier tri peut être effectué par l'ensemble du groupe. Celui-ci consiste alors à éliminer les termes qui ne peuvent pas être qualifiés de descripteur, c'est-à-dire qui ne décrivent pas l'élément du produit qui est à évaluer. Cette première réduction, effectuée en groupe, est généralement assez simple à opérer.

Une première réduction de cette liste a pu rapidement être effectuée en éliminant les descripteurs qui, bien que utilisés pour caractériser une anomalie observée, ne renseignaient pas sur la nature de l'anomalie. C'était le cas du descripteur Vis qui renseignait sur le point de localisation de l'anomalie, du descripteur Soudure qui précisait le procédé impliqué dans l'apparition de cette anomalie ou des descripteurs Sale, Trop Mince, Etat de surface pas net qui se limitaient donc à donner des informations sur l'effet de l'anomalie sur le composant concerné.

Au fil du temps, les experts du groupe ont adopté les mêmes mots pour décrire certaines anomalies. Par exemple, le terme de Fraie définie par beaucoup d'experts comme étant une fine et légère raie a été peu à peu remplacé par celui de Raie (idem pour les termes de Poil remplacé par Particule). Cette première réduction (étape 3) a donc rapidement été obtenue grâce à la synergie de groupe qui s'est créée lors de la première étape de la démarche.

La liste initiale de 31 descripteurs, obtenue à l'issue de l'étape 2, a donc été réduite à 25 descripteurs.

2.3.4.2 2EME REDUCTION

Pour réaliser une seconde réduction sur la liste des descripteurs, nous proposons de prendre en compte l'ensemble des données collectées lors du dépouillement des formulaires remplis par les membres du groupe (Figure 24).

Cette seconde réduction prend donc en compte les éléments suivants :

- le nombre N de citations de chaque descripteur par l'ensemble des membres du groupe et pour l'ensemble des produits présentés

$$N_{citations} = \sum_{Descripteur} citations \quad \text{Équation 1}$$

- la part F de ce nombre de citations par rapport au nombre total,

$$F(\%) = \frac{N_{citations}}{Nombre\ total\ de\ citations} \times 100 \quad \text{Équation 2}$$

- la somme S des valeurs d'intensité attribuées à chaque descripteur

$$S_{intensités} = \sum_{Descripteur} intensités \quad \text{Équation 3}$$

- la part I de cette somme par rapport à la somme totale des intensités

$$I(\%) = \frac{S_{intensités}}{Somme\ totale\ des\ intensités} \times 100 \quad \text{Équation 4}$$

- l'importance M de chaque descripteur donnée par la racine carrée du produit de F par I qui représente la moyenne géométrique.

$$M = \sqrt{F \times I}$$

Équation 5

Grâce à cette moyenne géométrique, nous pouvons ainsi classer par ordre croissant l'ensemble des descripteurs. Ce classement intègre donc à la fois le nombre de fois que le descripteur a été cité et les différentes intensités qui lui ont été données.

Pour effectuer cette deuxième réduction, nous nous sommes basés sur les données du Tableau 3.

Anomalies	nombre de citations	F(%)	Intensité	I (%)	Moyenne géométrique	Classement
raie	42,00	20,00	104,00	8,25	12,85	1
fraie	38,00	18,10	80,00	6,35	10,72	2
rayure	13,00	6,19	37,00	2,94	4,26	3
bulle	5,00	2,38	15,00	1,19	1,68	4
coup	5,00	2,38	12,00	0,95	1,51	5
point	5,00	2,38	11,00	0,87	1,44	6
déformation	5,00	2,38	9,00	0,71	1,30	7
particule	4,00	1,90	9,00	0,71	1,17	8
tache	4,00	1,90	8,00	0,63	1,10	9
point noir	3,00	1,43	7,00	0,56	0,89	10
marque	2,00	0,95	7,00	0,56	0,73	11
piqûre de soudage	2,00	0,95	6,00	0,48	0,67	12
colle	2,00	0,95	3,00	0,24	0,48	13
égrisure	1,00	0,48	5,00	0,40	0,43	14
noir	1,00	0,48	4,00	0,32	0,39	15
défaut de forme	1,00	0,48	3,00	0,24	0,34	16
pore apparent	1,00	0,48	3,00	0,24	0,34	17
variation de couleur	1,00	0,48	3,00	0,24	0,34	18
petite marque	1,00	0,48	2,00	0,16	0,27	19
résidu	1,00	0,48	2,00	0,16	0,27	20
brillance	1,00	0,48	2,00	0,16	0,27	21
pigmentation	1,00	0,48	2,00	0,16	0,27	22
patate	1,00	0,48	1,00	0,08	0,19	23
poil	1,00	0,48	1,00	0,08	0,19	24
porosité	1,00	0,48	1,00	0,08	0,19	25

Tableau 3: Classement des descripteurs

Un classement, établi par ordre décroissant sur la valeur de la moyenne géométrique, a ainsi montré les descripteurs à retenir dans la liste : ceux beaucoup cités comme Raie (42 fois cités), mais aussi ceux, comme Marque peu cité mais dont l'intensité totale était importante (égale à 7). La liste a ainsi pu être réduite à 12 descripteurs (Raie, Fraie, Rayure, Bulle, Coup, Point, Déformation, Particule, Tache, Point noir, Marque, Piqûre de soudage) dont les valeurs M étaient toutes supérieures à un seuil que nous avons défini pour ce cas à 0,5.

Nous n'avons pas retenu le descripteur Egrisure qui, bien qu'ayant une valeur d'intensité importante égale à 5, a été très peu cité (1 seule fois par un seul expert). Nous avons fait en cela l'hypothèse que si cette anomalie a une intensité aussi importante, c'est qu'elle a été très nettement perçue par le sujet qui l'a citée, et donc que les six autres sujets l'ont vraisemblablement citée à l'aide d'autres descripteurs.

2.3.4.3 3EME REDUCTION

Cette troisième réduction sur la liste des descripteurs prend en compte les éléments suivants :

- le nombre d'évaluations N' pour chaque produit par l'ensemble des membres du groupe et pour l'ensemble des produits présentés

$$N'_{évaluation} = \sum_{Produit} évaluations \quad \text{Équation 6}$$

- la part F' de ce nombre d'évaluations par rapport au nombre total,

$$F'(\%) = \frac{N'_{évaluation}}{\text{Nombre total d'évaluations}} \times 100 \quad \text{Équation 7}$$

- la somme S' des valeurs d'intensité attribuées à chaque produit

$$S'_{intensités} = \sum_{Produit} intensités \quad \text{Équation 8}$$

- la part I' de cette somme par rapport à la somme totale des intensités

$$I'(\%) = \frac{S'_{intensités}}{\text{Somme totale des intensités}} \times 100 \quad \text{Équation 9}$$

- l'importance M' de chaque produit donnée par la racine carrée du produit de F' par I' qui représente la moyenne géométrique.

$$M' = \sqrt{F' \times I'} \quad \text{Équation 10}$$

Grâce à cette moyenne géométrique, nous pouvons ainsi classer par ordre croissant l'ensemble des produits. Ce classement intègre donc à la fois le nombre de fois que le produit a été cité et les différentes intensités qui lui ont été données.

Pour effectuer cette troisième réduction, nous nous sommes basés sur les données du Tableau 3 et de la liste de descripteurs obtenue à l'issue de la deuxième réduction.

Numéro des produits	Nombre de Citations	F' (%)	Intensité	I' (%)	Moyenne géométrique	Classement
1	10	7,81	33	10,71	9,15	1
19	8	6,25	22	7,14	6,68	2
17	9	7,03	19	6,17	6,59	3
12	6	4,69	18	5,84	5,23	4
4	6	4,69	14	4,55	4,62	5
30	6	4,69	14	4,55	4,62	6
2	5	3,91	12	3,90	3,90	7
26	5	3,91	11	3,57	3,74	8
23	5	3,91	10	3,25	3,56	9
6	4	3,13	12	3,90	3,49	10
22	4	3,13	12	3,90	3,49	11
27	4	3,13	12	3,90	3,49	12
18	4	3,13	11	3,57	3,34	13
16	5	3,91	8	2,60	3,19	14
24	5	3,91	8	2,60	3,19	15
15	4	3,13	9	2,92	3,02	16
20	4	3,13	9	2,92	3,02	17
3	3	2,34	9	2,92	2,62	18
5	4	3,13	6	1,95	2,47	19
25	3	2,34	8	2,60	2,47	20
11	3	2,34	7	2,27	2,31	21
14	3	2,34	7	2,27	2,31	22
21	4	3,13	5	1,62	2,25	23
28	3	2,34	5	1,62	1,95	24
7	2	1,56	6	1,95	1,74	25
8	2	1,56	6	1,95	1,74	26
13	2	1,56	5	1,62	1,59	27
29	2	1,56	4	1,30	1,42	28
9	2	1,56	3	0,97	1,23	29
10	1	0,78	3	0,97	0,87	30

Tableau 4 : Classement des produits

Un classement, établi par ordre décroissant sur la valeur de la moyenne géométrique, a ainsi montré que les produits à retenir dans la liste étaient ceux dont les valeurs M étaient toutes supérieures à un seuil que nous avons défini pour ce cas à 3,5. Nous avons donc retiré les produits numéro 3, 5, 25, 11, 14, 21, 28, 7, 8, 13, 29, 9, 10, 6, 22, 27, 18, 16, 24, 15 et 20.

Notons que les produits numéro 6, 14 et 16 n'avaient été cités qu'une seule ou deux fois par les sujets. Cela a eu pour effet d'éliminer de la liste les descripteurs qui associés à ces trois produits, à savoir les descripteurs Point et Piqûre de soudage. La liste a donc été réduite à 10 descripteurs : Raie, Fraie, Rayure, Bulle, Coup, Déformation, Particule, Tache, Point noir et Marque.

2.3.4.4 4EME REDUCTION

Une nouvelle réduction peut être obtenue, comme préconisée dans de nombreux articles ([Faye et al., 2004] [Giboreau et al., 2001] [Sauvageot et al., 2005] [Villarino et al., 2006]), à

partir de l'utilisation des méthodes d'analyse de données (Annexe 3). L'analyse factorielle des correspondances (AFC) par exemple, permet de faire des regroupements de descripteurs de manière à mettre en évidence la dépendance ou non de certains d'entre eux. A chaque regroupement, il est demandé aux membres de groupe par consensus de nommer par un seul terme ce regroupement.

Une validation finale est ensuite effectuée en réalisant une nouvelle analyse factorielle avec les nouveaux termes définis.

Pour cette étape, nous avons donc réalisé une analyse factorielle des correspondances (AFC) à partir d'un tableau de données regroupant le nombre de citations des 12 descripteurs par les 7 sujets (soit, par exemple, les termes raie1, raie2, ..., raie7 pour désigner respectivement les citations du descripteur Raie par les 7 sujets).

Nous avons alors obtenu le tableau suivant :

	Numéro des produits								
	1	2	4	12	17	19	23	26	30
raie1	0	0	1	1	1	2	0	1	1
raie2	3	0	0	0	0	4	0	0	3
déformation2	0	2	0	0	0	0	0	0	0
fraie2	0	0	0	1	2	2	2	0	0
fraie3	0	0	2	0	2	3	0	0	1
particule3	0	0	0	0	0	0	1	0	0
marque3	4	0	0	0	0	0	0	0	0
raie4	0	0	0	4	2	0	0	0	0
déformation4	0	2	0	0	0	0	0	0	0
raie5	3	0	3	0	0	0	0	0	0
fraie5	0	0	0	0	2	2	2	3	3
coup5	4	0	0	0	2	0	0	0	0
bulle5	3	4	0	0	0	0	0	0	0
raie6	5	0	3	5	4	4	0	0	0
déformation6	0	1	0	0	0	0	0	2	0
fraie6	0	0	2	0	1	2	2	1	3
bulle6	2	0	0	0	0	0	0	0	0
point noir6	1	0	0	0	0	0	0	0	0
raie7	4	0	3	4	0	0	0	0	0
tache7	0	3	0	0	0	0	0	0	0
bulle7	4	0	0	0	0	0	0	0	0
point noir7	0	0	0	3	0	0	0	0	0
rayure7	0	0	0	0	3	3	3	4	3

Tableau 5 : Liste de descripteurs après la troisième réduction

L'objectif était de mettre en évidence les similarités entre les descripteurs cités par les différents membres du groupe. Nous avons alors réalisé une première AFC.

La table des valeurs propres était la suivante (Tableau 6) :

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Valeur propre	0,806	0,612	0,380	0,253	0,150	0,123	0,090	0,021
Inertie (%)	33,118	25,141	15,601	10,377	6,158	5,038	3,706	0,862
% cumulé	33,118	58,259	73,860	84,237	90,394	95,432	99,138	100,000

Tableau 6 : Table des valeurs propres de l'AFC

Nous avons constaté, d'une part que toutes les valeurs propres étaient inférieures à 1 et, d'autre part, que trois axes suffisaient à couvrir 73,86% de l'information totale.

La Figure 25 montre la représentation obtenue à l'issue de cette première analyse sur les axes 1 et 2.

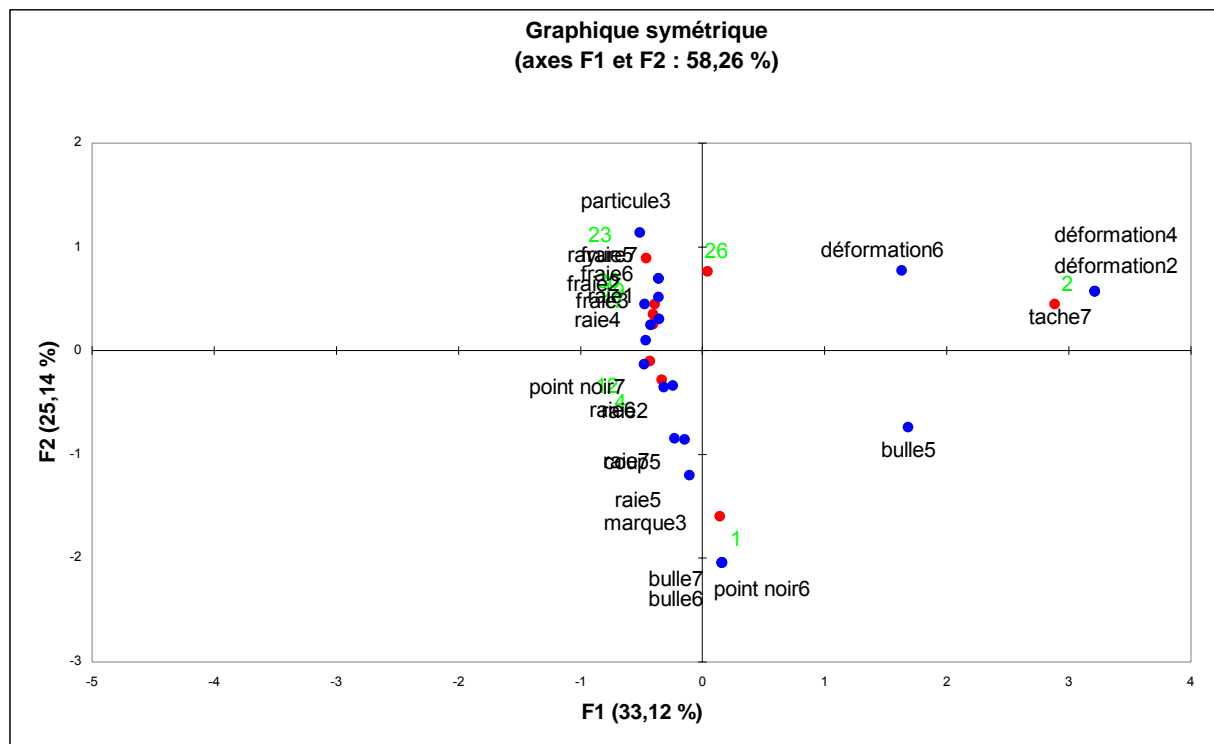


Figure 25 : Résultat de la première analyse AFC – Axes 1 et 2

La représentation obtenue a permis de mettre en évidence un premier groupe qui permettait aussi d'expliquer l'axe 1 : déformation2, déformation4 et déformation6. Nous notons aussi la proximité des deux termes tache7 et bulle5 également cités pour le produit 2. Y avait-il deux anomalies sur ce produit ou était-ce une même anomalie décrite de deux manières différentes ? L'analyse qui suivra nous confirmera qu'il s'agissait effectivement de deux anomalies différentes.

L'axe 2 a quant à lui pu être expliqué par la mise en opposition à la fois du groupe "bulle7, bulle6, point noir6" et du terme particule3.

Les figures 7 et 8 montrent les représentations qui ont été obtenues sur les axes 1 et 3 et les axes 2 et 3.

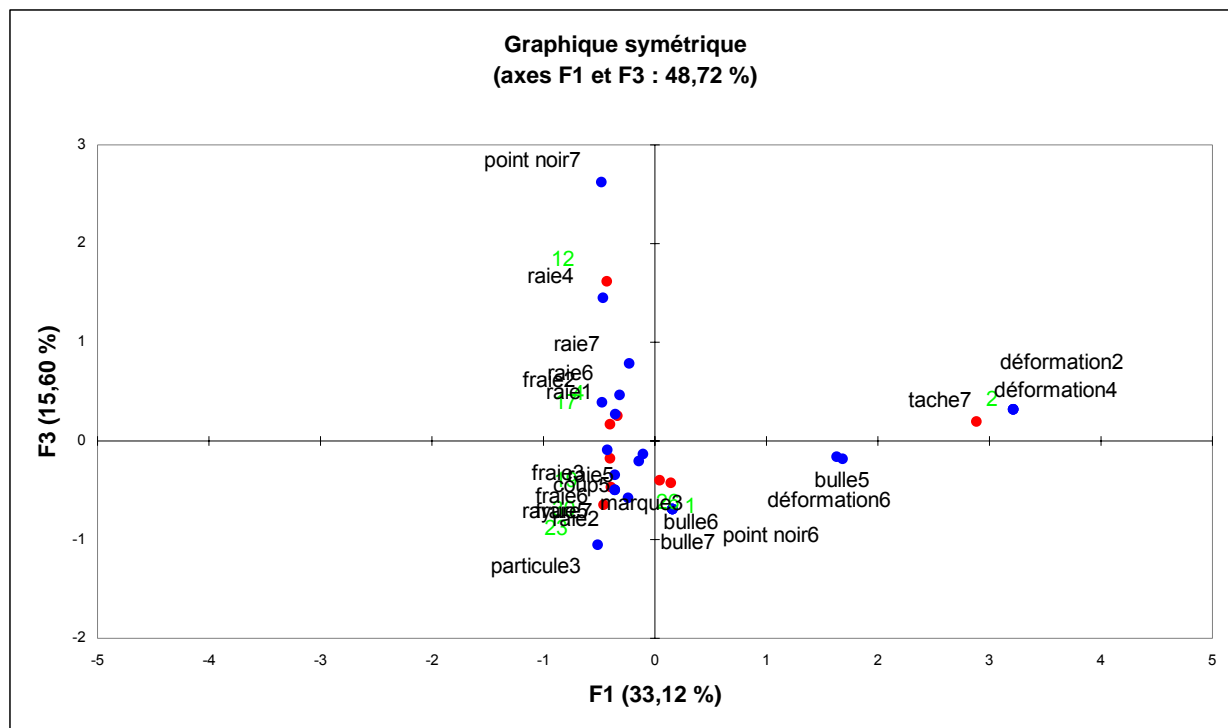


Figure 26 : Résultat de la première analyse AFC – Axes 1 et 3

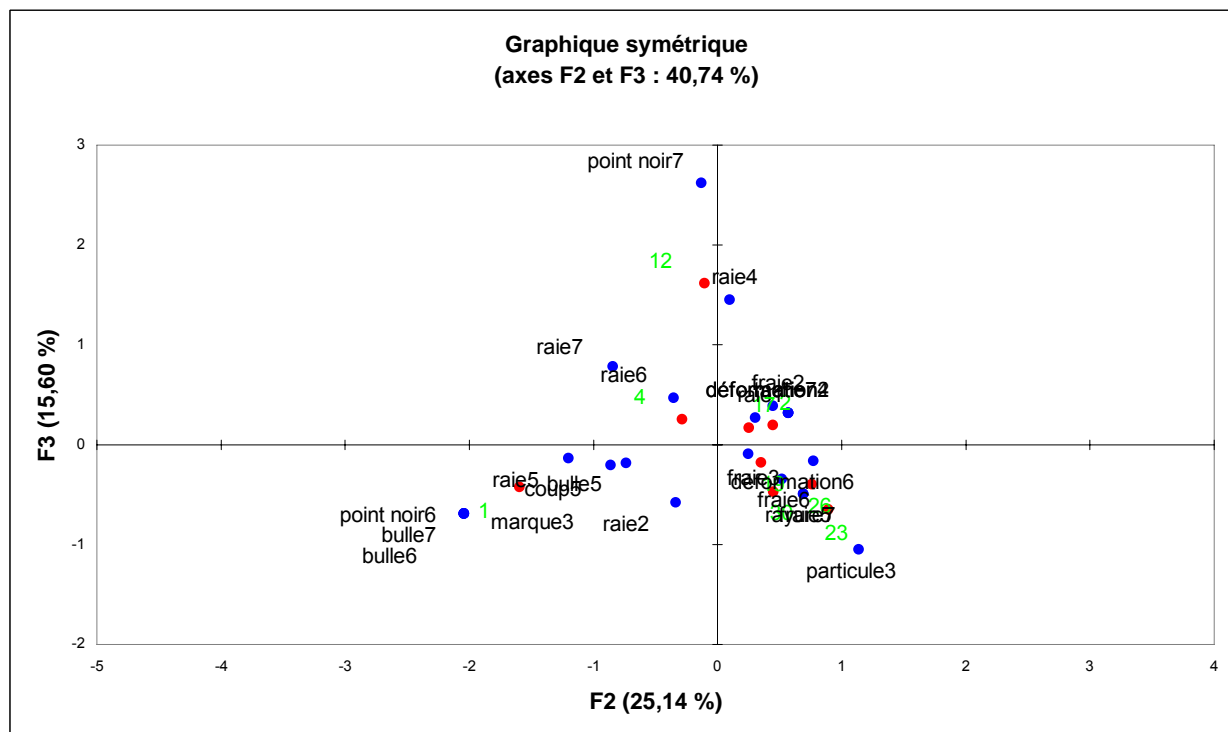


Figure 27 : Résultat de la première analyse AFC – Axes 2 et 3

L'opposition de deux termes point noir7 et particule3 expliquaient l'axe 3.

Cette première analyse a donc permis, grâce à la mise en évidence sur les trois axes d'oppositions entre certains termes, trois groupes :

- déformation 2, déformation4, déformation6
- point noir6, bulle7, bulle6
- particule3

Cette analyse a ensuite été complétée d'une représentation sur les axes 3 et 4 (Figure 28).

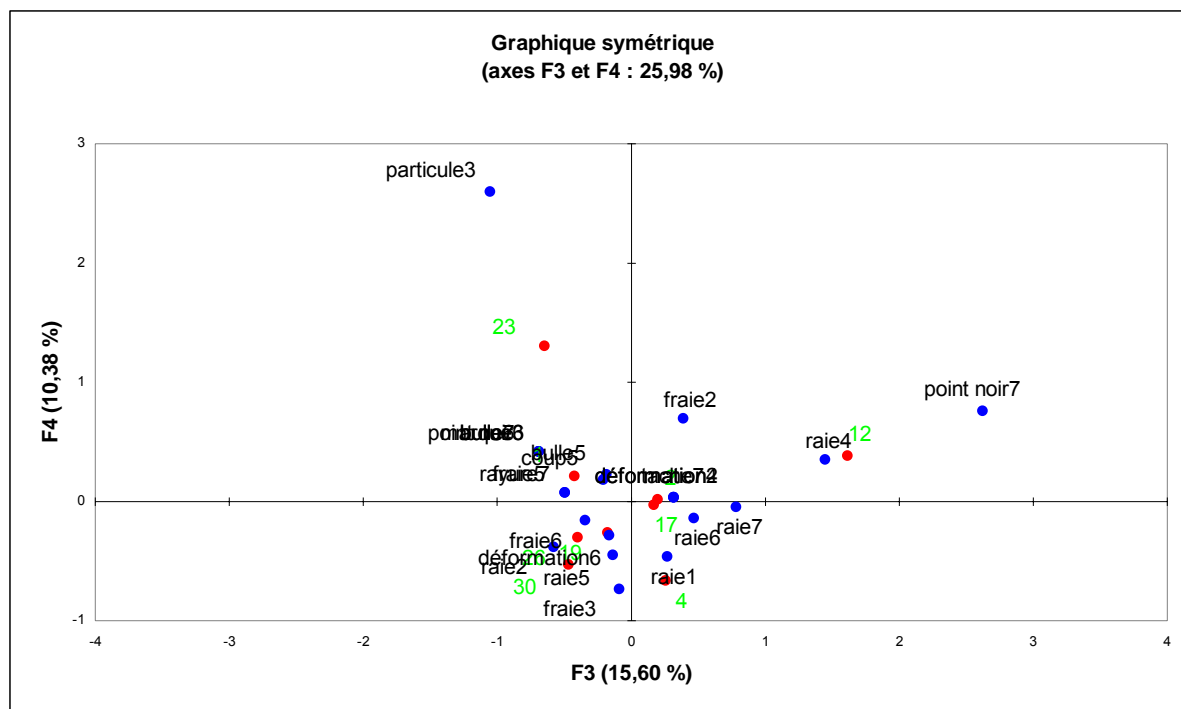


Figure 28 : Résultat de la première analyse AFC – Axes 3 et 4

L'axe 4 était donc expliqué par l'opposition du groupe "fraie3, raie5, raie1..." et du terme particule3.

A l'issue de l'analyse, ce sont ainsi quatre groupes qui ont pu ainsi définir :

- le groupe G1 regroupant l'unique descripteur Déformation,
- le groupe G2 regroupant les descripteurs Point noir et Bulle,
- le groupe G3 regroupant l'unique descripteur Particule,
- le groupe G4 regroupant les descripteurs Raie et Fraie.

Les experts ont ensuite été chargés d'associer à chacun de ces quatre groupes un même et unique terme générique, représentatif d'un ensemble d'anomalies observées sur les produits évalués. La liste initiale des 10 descripteurs a ainsi pu être réduite à quatre descripteurs : Marque, Tache, Déformation et Particule.

Pour vérifier la validité de cette réduction, et en particulier la pertinence de ces quatre descripteurs obtenus, nous avons positionné l'ensemble des 25 descripteurs initiaux par rapport à ces quatre groupes. Le Tableau 7 montre le résultat de ce positionnement..

Marque	<i>Raie, Fraie, Rayure, Coup, Marque, Piqûre de soudage, Pore apparent, Petite marque, Pigmentation, Brilliance, Egrisure, Porosité</i>
Tache	<i>Tache, Point noir, Variation de couleur, Colle, Bulle</i>
Déformation	<i>Déformation, Défaut de forme, Patate, Résidu</i>
Particule	<i>Particule, Poil</i>

Tableau 7 : Pertinence des descripteurs

Ce résultat nous a confirmé la pertinence des quatre descripteurs obtenus, puisque 22 descripteurs sur les 25 cités par les sujets ont pu être rattachés à l'un au moins de ces quatre descripteurs. Ce regroupement a également permis de se rendre compte du manque de pertinence des descripteurs initiaux Point et Noir qui, parce qu'ils sont trop imprécis, n'ont pas pu être rattachés à un descripteur unique (Marque ou Tache pour Point, Tache ou Particule pour Noir).

2.3.4.5 VALIDATION DE LA LISTE DEFINITIVE DE QUATRE DESCRIPTEURS

Réduire le nombre de descripteurs afin d'obtenir une liste définitive est l'objectif de cette étape. Mais encore faut-il pour cela s'assurer que cette réduction ne contribue pas à perdre de l'information sur la description des produits évalués.

Une nouvelle analyse doit donc confirmer l'absence de perte d'informations pouvant résulter de la réduction du nombre de descripteurs. Elle doit confirmer également une très bonne cohérence des évaluations en montrant que les sujets partagent la même vision des intensités des anomalies observées.

Pour cela, les descripteurs obtenus doivent respecter un certain nombre d'exigences attendues, parmi lesquelles on trouve:

- l'exhaustivité : les descripteurs couvrent l'ensemble des anomalies pouvant être présentes sur un produit,
- la pertinence : les descripteurs sont tous appropriés pour décrire les anomalies d'un produit,
- la précision : les descripteurs permettent de décrire de manière claire les anomalies d'un produit,
- le pouvoir discriminant : les descripteurs permettent de singulariser un produit par rapport à un autre,
- l'indépendance : les descripteurs recouvrent des anomalies parfaitement distinctes sur un produit

Nous proposons donc de valider la liste de descripteurs obtenue à l'issue de la 4^{ème} réduction par une nouvelle évaluation de produits. Lors de cette évaluation, il sera alors demandé aux membres du groupe d'évaluer de nouveaux produits en utilisant uniquement les termes de la liste définitive. Dans ce cas, une nouvelle analyse factorielle des correspondances pourra aider à traiter les résultats de cette nouvelle expérimentation.

Pour valider cette liste finale de descripteurs, un nouveau groupe de 4 personnes a été chargé d'utiliser la liste des 4 réducteurs pour l'évaluation de 30 nouveaux produits (ces 4 personnes ont été choisies parmi les 7 personnes ayant réalisées les évaluations précédentes).

Une nouvelle analyse factorielle des correspondances a ensuite été réalisée. Par rapport à l'analyse précédente, le tableau de données incluait également les valeurs intensité (de 1 à 6) associées aux descripteurs cités. La Figure 29 montre la représentation obtenue sur les axes 1 et 2.

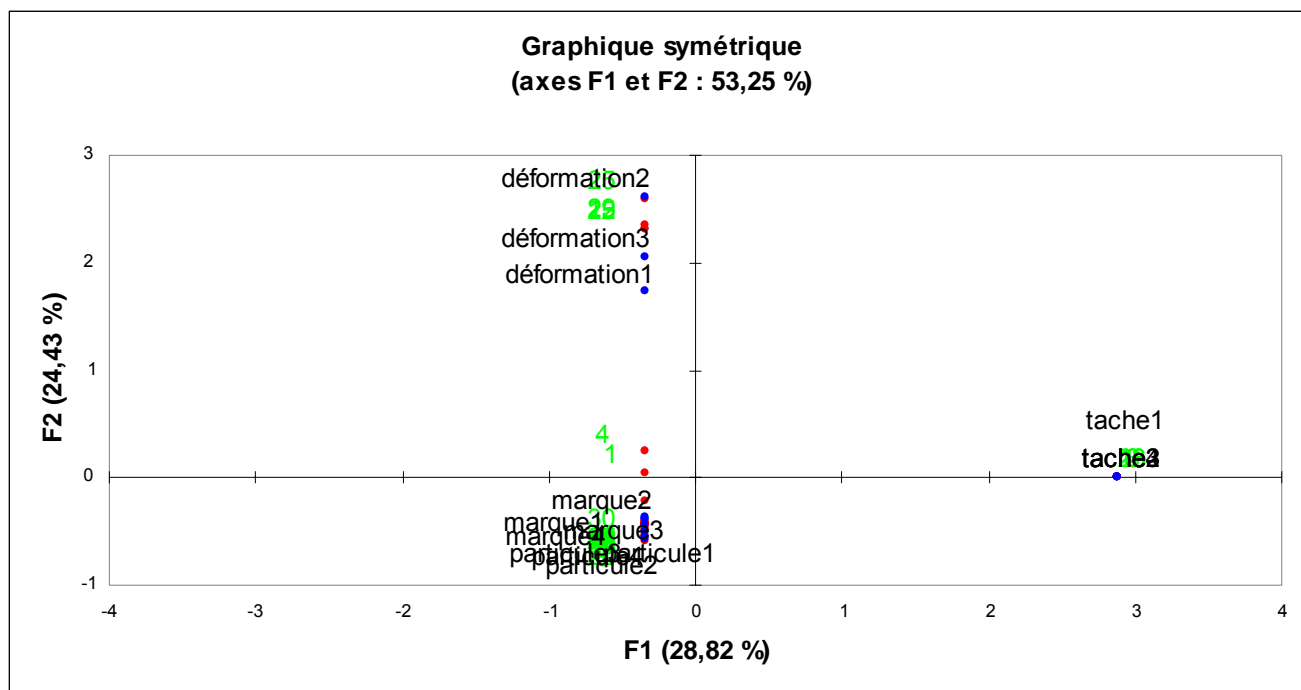


Figure 29 : Résultat de l'analyse AFC avec la liste finale de descripteurs – Axes 1 et 2

La Figure 30 nous montre les résultats obtenus sur les axes 1 et 3.

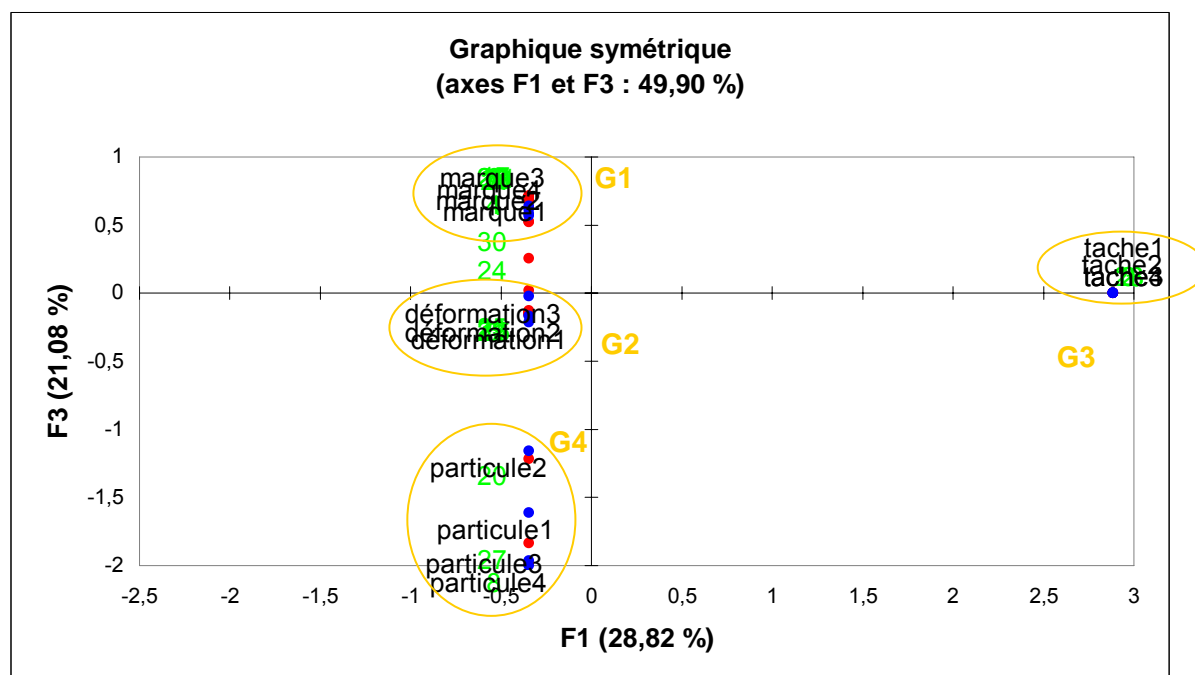


Figure 30 : Résultat de l'analyse AFC avec la liste finale de descripteurs – Axes 1 et 3

La représentation sur les axes 1 et 3 a confirmé l'existence des quatre groupes d'anomalies :

- le groupe G1 illustrant l'utilisation du descripteur Marque par les 4 sujets
- le groupe G2 illustrant l'utilisation du descripteur Déformation par 3 sujets (le sujet 4 n'ayant pas perçu cette anomalie)
- le groupe G3 montrant l'utilisation du descripteur Tache par les 4 sujets
- le groupe G4 illustrant l'utilisation du descripteur Particule par les 4 sujets

La liste finale de descripteurs ayant été validée, et afin de fiabiliser encore la cohérence des évaluations, chacun des descripteurs a pu être défini de manière précise (Tableau 8).

Descripteur	Définition
<i>Marque</i>	Toute trace laissée sur la surface de la pièce représentant un manque de matière ponctuelle
<i>Tache</i>	Tout changement de couleur ponctuelle sur la surface, ombre, nuage
<i>Déformation</i>	Tout changement de forme, altération de la forme initiale
<i>Particule</i>	Tout corps étranger

Tableau 8 : Les 4 descripteurs et leurs définitions

2.3.5 ETAPE 4 : ÉTABLISSEMENT D'UNE LISTE DE DESCRIPTEURS LIMITES

2.3.5.1 CARACTERISTIQUES DES DESCRIPTEURS

Le principal risque d'une réduction excessive du nombre de descripteurs est, nous l'avons dit précédemment, la perte d'information qui peut en résulter sur la description des produits. Pour que chaque réducteur soit utilisé de manière optimale, il s'agit donc de lui associer des caractéristiques spécifiques qui pourront compléter si nécessaire la description du produit. Ces caractéristiques permettent également au sujet d'améliorer encore son expertise sur le produit.

Pour éviter que la réduction de 25 à 4 descripteurs ne génère une perte d'informations sur les anomalies observées, chacun des quatre descripteurs obtenus a été associé à un ensemble de caractéristiques spécifiques à renseigner (Tableau 9). Par exemple, un sujet décrivant une anomalie à l'aide du descripteur Marque devait renseigner des caractéristiques propres à ce type d'anomalie, à savoir la profondeur, la longueur et la densité. Ces données complémentaires fournissent ainsi au moins autant d'informations sur l'anomalie observée que celles résultant de l'utilisation par le sujet d'un descripteur Coup, certes plus précis, mais pour lequel aucune donnée complémentaire à renseigner n'est définie.

Descripteur	Caractéristiques à renseigner
<i>Marque</i>	<i>Profondeur, Largeur, Densité</i>
<i>Tache</i>	<i>Surface, Densité</i>
<i>Déformation</i>	<i>Surface, Densité</i>
<i>Particule</i>	<i>Libre ou Fixe, Couleur, dépassement de la zone</i>

Tableau 9 : Les 4 descripteurs et leurs caractéristiques

Cette réduction du nombre de descripteurs a permis de maintenir une cohérence dans les évaluations réalisées, les sujets partageant un vocabulaire commun et une même grille d'évaluation (échelle d'intensité commune et caractéristiques à renseigner préétablies). Ces

caractéristiques servent à établir l'échelle d'intensité. En effet, l'intensité renseignée est une combinaison entre les différentes caractéristiques pour un descripteur donné. Aussi, et nous le verrons dans les paragraphes suivants, la bonne utilisation des descripteurs et de l'intensité dépendent de la précision apportée à ces caractéristiques.

Nous vérifierons plus loin que ces descripteurs respectent les cinq caractéristiques exposées au chapitre 1 : la pertinence, la précision, la discrimination, l'indépendance et l'exhaustivité.

2.3.5.2 CONSTRUCTION DE LA GRILLE D'INTENSITE

La grille d'intensité fait intervenir deux critères, d'une part la perception de l'anomalie et, d'autre part les caractéristiques de cette anomalie. Il est donc nécessaire de répondre à ces deux critères par un outil d'évaluation capable de donner une évaluation répétable et reproductible par l'ensemble des sujets ayant à donner un jugement sur le produit. Le travail en amont sur la liste finale de descripteurs et les caractéristiques à renseigner trouve donc ici tout son sens. La grille d'intensité sera en effet utilisée pour assister le sujet à l'évaluation du produit. Bien évidemment, cette grille dépend des descripteurs définis ainsi que des caractéristiques associées à ces descripteurs.

La construction d'une grille d'intensité devra donc prendre en compte deux points.

Le premier point se réfère à la nécessité de prendre en compte le récepteur sensoriel (voir chapitre 1) utilisé lors de l'expérimentation. Chaque récepteur sensoriel est en effet parfois très différent d'une expérimentation à l'autre et le plus souvent complexe à gérer. Il convient donc de prendre le temps de bien comprendre son mécanisme et la manière dont il va être utilisé lors de l'expérimentation. La grille doit donc renseigner sur la manière d'utiliser au mieux ce récepteur afin de le rendre aussi capable qu'un instrument de mesure traditionnel.

Le second point se réfère quant à lui aux caractéristiques des descripteurs pour évaluer l'anomalie. Les valeurs données à ces caractéristiques permettront de donner une intensité correcte à l'anomalie.

× L'appréciation de l'anomalie par l'œil

L'appréciation de l'anomalie par l'œil représente la première colonne de la grille d'intensité. Cette colonne renseigne sur l'intensité de l'anomalie perçue par l'œil sans instrument (pas de loupe, pas de binoculaire...). Le choix de la valeur de cette intensité est donc basée sur l'expérience propre des experts et se base sur le vocabulaire laissé libre utilisé lors de l'étape 2 (définition des premiers descripteurs).

Les expressions qui ont retenues sont :

- non vu*
- vu après un examen approfondi*
- vu d'un certain angle*
- vu*
- vu du premier regard*

Le Tableau 10 montre comment ces expressions ont été associées à la grille de valeurs d'intensité comprises entre 1 et 6.

	Vision Œil Standard
1	Non
2	Vu après un examen approfondi
3	Vu que d'un certain angle
4	Oui
5	Oui
6	Vu au premier regard

Tableau 10 : Première colonne de la grille d'intensité

La valeur 1 de l'intensité se réfère à des anomalies qui ont été perçues à l'aide d'un instrument (par exemple, un binoculaire) mais qui n'ont pas été perçus par l'œil en vision standard (œil nu ou corrigé si besoin).

La valeur 2 de l'intensité se réfère à des anomalies perçues, mais seulement après un examen approfondi. L'attribution de cette valeur par le sujet se fait suite à des remarques du type "il faut trouver l'anomalie !" ou encore "je viens de perdre l'anomalie, je ne la retrouve plus".

La valeur 3 de l'intensité est la plus délicate. Elle englobe les intensités visibles seulement sous un certain angle. Par souci de clarté, il a été défini trois angles principaux de vision provoquant respectivement trois effets différents. Ces trois effets sont basés sur les lois sur la réflexion et sur la réfraction de la lumière énoncés par Snell (1591-1626) et reprises par R. Descartes. Lorsqu'un rayon incident arrive sur une surface ayant un indice de réfraction n' , il forme avec la normale au plan un angle i . Le rayon est alors, d'une part réfléchi formant un angle i' avec la normale, et d'autre part, réfracté formant un angle r avec la normale. Ce cas général est représenté sur la Figure 31.

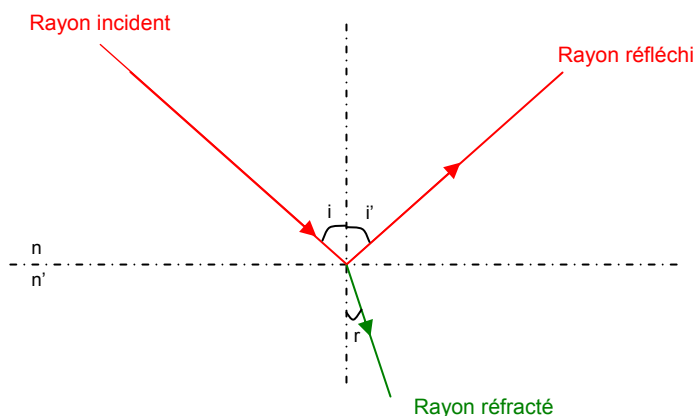


Figure 31 : Schéma de principe sur la réflexion et réfraction de la lumière

Cependant, certains angles incidents offrent des cas particuliers aux lois définies par Descartes. D'abord, il existe un angle incident limite qui provoque un rayon suivant la tangente au plan. Ensuite, lorsque cet angle limite est dépassé, la réflexion est totale. (Figure 32)

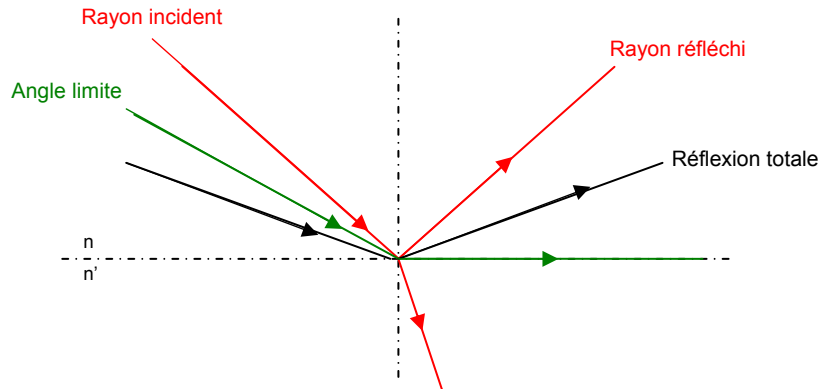


Figure 32 : Les angles particuliers

Ce cas général et ces cas particuliers de la réflexion de la lumière nous ont amené à distinguer trois effets (Figure 33, Figure 34 et Figure 35), chacun d'eux générés par un angle de positionnement différent du produit examiné (la position de la source lumineuse ne change pas).

- l'effet lumière noire

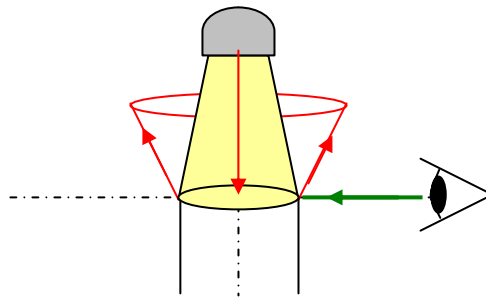


Figure 33 : Schéma de l'effet lumière noire

Dans cette situation, le rayon lumineux arrive perpendiculairement à la surface de la pièce et donc se réfléchit aussi perpendiculairement. Le sujet a donc une image de la surface matifiée de la pièce, et donc un effet dit de Lumière noire (Figure 33).

- L'effet brillance

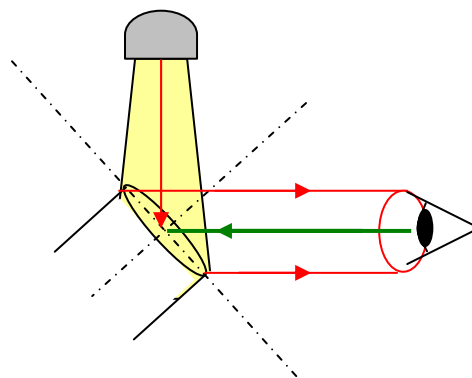


Figure 34 : Schéma de la brillance

Dans cette situation, la pièce reçoit un rayon incident et renvoie un rayon réfracté de telle sorte que le sujet se place dans la trajectoire de ce rayon. Le sujet est donc ébloui par la surface de la pièce ce qui permet de définir cet effet comme étant un effet de brillance (Figure 34).

- l'effet miroir

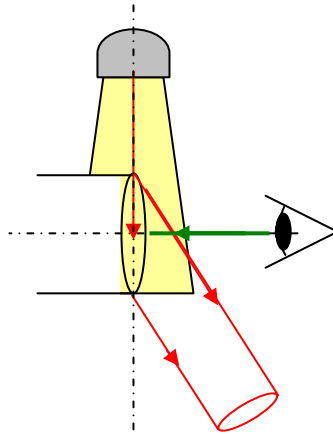


Figure 35 : Schéma de l'effet miroir

Ce dernier effet est marqué par un rayon incident qui arrive sur la surface de la pièce tangentiellement. La vision du sujet est donc normale au plan de la surface. Cette configuration permet au sujet d'avoir son reflet dans le produit (effet miroir) (Figure 35).

Les valeurs 4 et 5 de l'intensité se réfèrent à une anomalie visible sans difficulté à l'œil standard, et ceci quelque soit l'angle de vision utilisé.

Enfin, la valeur 6 de l'intensité se réfère à une anomalie visible sans équivoque au premier coup d'œil du sujet.

× *Evaluation de l'anomalie en utilisant les caractéristiques de chaque descripteur*

Les différentes caractéristiques définies dans le Tableau 9 ont permis de construire la grille d'intensité.

Cette construction s'est opérée en prenant en considération les termes du vocabulaire laissé libre par l'expérimentateur lors de l'étape 2.

Par exemple, le descripteur Marque était caractérisé par une profondeur, une largeur et une densité. Ces trois caractéristiques pouvaient ensuite être détaillées à l'aide de différents termes comme le montre le Tableau 11.

Profondeur	Peu	avoir la sensation qu'on a effleuré la surface
	moyenne	avoir la sensation qu'en passant le doigt dessus on sent l'anomalie
	très	avoir la sensation qu'en passant l'ongle il est retenu
Longueur	Courte	
	Moyenne	
	longue	entièrement le long de la zone de l'anomalie
Densité	Unique	
	plusieurs éparpillées sur la pièce	
	condensées sur une zone	

Tableau 11 : Décomposition de l'anomalie Marque

Ainsi, pour chaque descripteur, le sujet a construit une combinaison de termes pour les différentes caractéristiques de ce descripteur. La Figure 17 montre par exemple, les combinaisons qui pouvaient être obtenues pour le descripteur Marque.

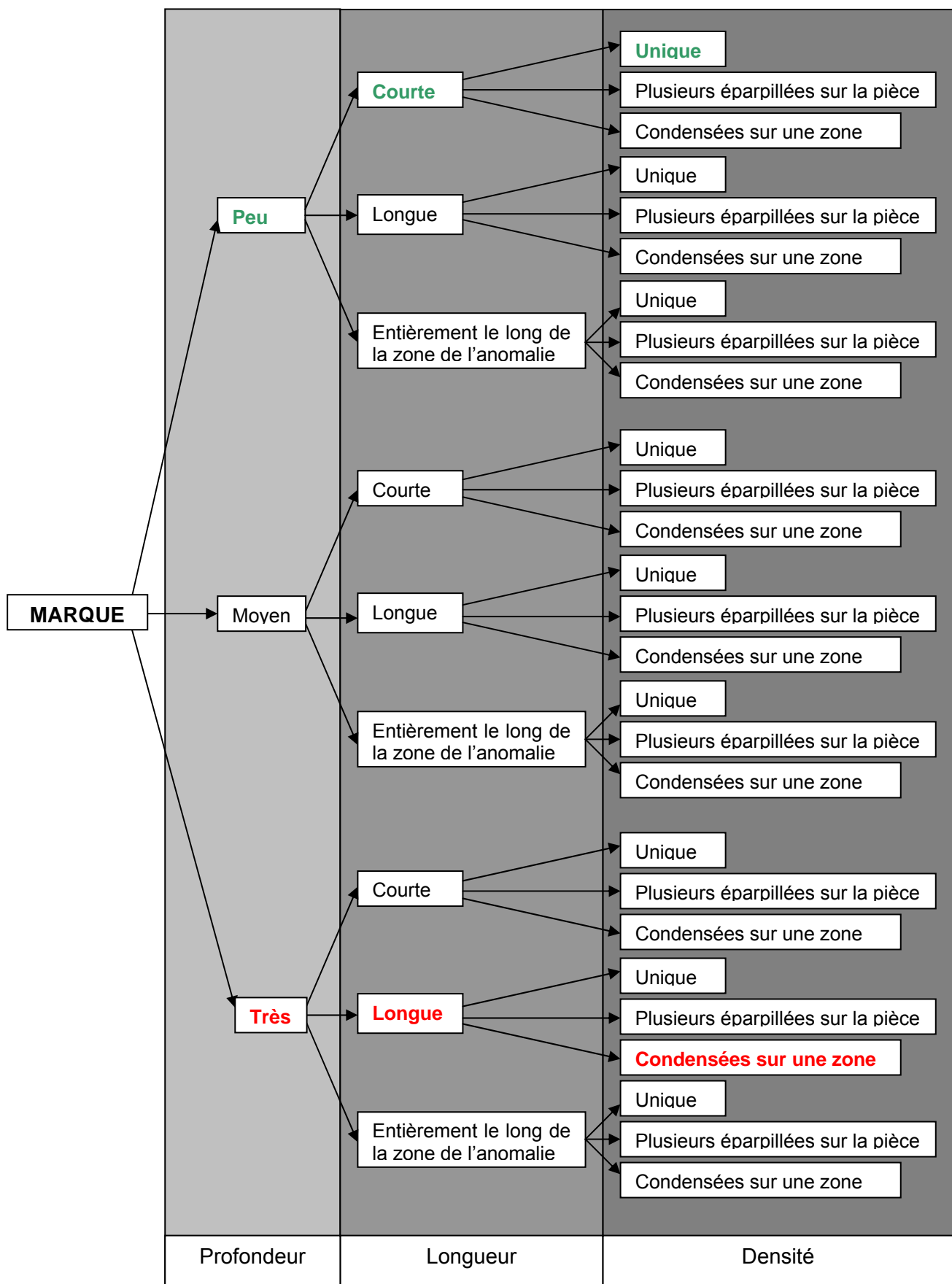


Figure 36 : Combinaisons possibles pour le descripteur Marque

Chaque combinaison engendrait donc un niveau d'intensité et donc une évaluation de l'anomalie différente. Pour une anomalie de type "Marque", le sujet avait donc 3³ possibilités de réponse (i.e. 27 possibilités). Cela permettait ainsi de rendre compte de la différence entre une marque peu profonde, courte et unique (intensité 1 sur une échelle de 6) ou une marque très profonde, longue et condensée sur une zone du produit (intensité 6 sur une échelle de 6).

Le vocabulaire jusqu'à présent utilisé pour décrire les produits a donc été formalisé dans une grille d'intensité. Les descripteurs ainsi obtenus respectaient les exigences attendues, à savoir :

- l'exhaustivité: les quatre descripteurs décrivaient l'ensemble des anomalies pouvant se trouver sur le produit.*
- la pertinence : ils étaient tous les quatre appropriés au produit*
- la précision : il n'y avait pas de confusion possible dans l'emploi de ces quatre termes*
- le pouvoir discriminant, ces quatre termes marquaient bien la différence entre deux produits*
- l'indépendance : les quatre descripteurs étaient totalement indépendants et ne se recouvraient pas pour la description du produit.*

2.4 PHASE 3 : LA VALIDATION DE LA DEMARCHE

2.4.1 ETAPE 6 : PHASE D'ENTRAINEMENT

L'utilisation de cette grille et de chacun de ces termes est alors utilisées par les experts dans une phase d'entraînement où chaque anomalie est évaluée grâce à la grille d'intensité. Les experts peuvent ainsi comparer leur notation pour la même anomalie perçue et par conséquent s'harmoniser sur les termes et l'intensité à donner (par exemple, dans quel cas une marque doit elle être jugée comme profonde ou longue).

2.4.2 ETAPE 7 : TEST DE REPETABILITE ET TEST DE REPRODUCTIBILITE

L'objectif de ces deux tests est de valider la phase d'entraînement avant de poursuivre la dernière phase de la démarche, appelée Utilisation (cette phase sera détaillée dans le chapitre 5 en tant qu'application de la démarche). Il s'agit alors de s'assurer que la démarche est acquise et de vérifier si les résultats obtenus sont suffisamment encourageants pour poursuivre cette démarche.

Par conséquent, le test de répétabilité a pour objectif de valider ou d'invalider la capacité de l'expert à évaluer l'anomalie.

Les tests de répétabilité et de reproductibilité présentés dans la littérature [Pillet, 2005] ne sont pas adaptés pour évaluer correctement la répétabilité et la reproductibilité de l'évaluation des produits. Ce manque a d'ailleurs donné lieu à la proposition d'un nouveau test qui sera détaillé dans le chapitre suivant. Dans cette première application, nous nous sommes d'abord limités à adapter le test classique R&R à notre cas.

2.4.2.1 TEST DE REPETABILITE

Après cette phase d'entraînement, les experts testent la pertinence de cette démarche et de l'évaluation qu'ils font des anomalies. Un test est d'abord réalisé pour évaluer la concordance de leurs résultats. Des produits leur sont donc présentés à deux reprises à une semaine d'intervalle. Pour chaque produit, le sujet évalue ce que son récepteur sensoriel lui transmet et donne ensuite une intensité à cette évaluation en utilisant respectivement la liste des descripteurs, ses caractéristiques et la grille d'intensité proposée. L'objectif de ce test est donc de comparer les résultats propres à chaque sujet et voir si entre ces deux évaluations, l'écart de l'intensité donnée est acceptable ou non.

Lors de ce test, 10 pièces ont été présentées à plusieurs experts à deux reprises, de manière non successive. A chaque pièce, chacun des experts devait donner l'intensité de l'anomalie, cette dernière étant identifiée sur le produit.

Le Tableau 12 montre un extrait des résultats obtenus :

Numéro de l'anomalie	Expert 1			Expert 2			Expert 3		
	1	2	D*	1	2	D*	1	2	D*
1	2	2	0	2	2	0	2	3	1
2	2	2	0	4	4	0	2	2	0
3	3	3	0	4	4	0	4	4	0
4	3	3	0	4	4	0	4	4	0
5	3	3	0	3	4	1	2	2	0
6	4	4	0	4	4	0	4	4	0
7	4	4	0	4	4	0	4	4	0
8	4	3	1	4	3	0	3	3	0
9	2	2	0	3	2	1	2	2	0
10	4	4	0	6	6	0	6	6	0

* Différence entre les deux intensités données par l'expert concerné

Tableau 12 : Extrait du test de répétabilité des experts

En analysant les résultats du Tableau 12, les différences D^* entre les deux évaluations montrait l'excellente répétabilité des experts (l'écart maximal relevé entre les intensités relevées pour les 3 experts était de 1).

2.4.2.2 TEST DE REPRODUCTIBILITE

Après avoir validé la répétabilité de la démarche, un second test est réalisé pour évaluer la concordance des résultats des sujets par rapport à la référence, i.e. l'intensité donnée collégalement par le groupe d'experts. Ce test consiste, comme le test de répétabilité, à évaluer des produits à deux reprises par chaque sujet en donnant une intensité. Ces résultats sont comparés, avec ceux de la référence.

Ce test doit donc être effectué en trois temps :

- tester les experts de la démarche dans l'optique de la valider.
- obtenir la valeur juste en demandant aux experts, d'effectuer leur propre évaluation (premier temps du test), d'évaluer ensemble le produit et donc de donner une intensité conjointement
- tester des sujets naïfs (après une formation à l'utilisation de la liste de descripteurs et de la grille d'intensité) afin de juger la démarche comme applicable dans le contexte donné

Les résultats de ce test sont alors étudiés de la manière suivante :

Ce biais entre les valeurs données par les experts et celles de la référence est évalué grâce au calcul de la moyenne \bar{z} :

$$\bar{z} = \frac{\sum z_i}{k} \quad \text{Équation 11}$$

avec

$$z_i = C_i - E_i \quad \text{Équation 12}$$

C_i : valeur de l'intensité donnée par un expert

E_i : valeur donnée par la référence

Avec un niveau de confiance donné, la variable de Student (t) à partir des résultats obtenus lors du test est :

$$t = \frac{\bar{z}}{\sigma/\sqrt{k}} \quad \text{Équation 13}$$

Cette valeur va alors être comparée à la variable de Student représentative du niveau de confiance voulu ($t_{1-\alpha/2, n-1}$) déterminée dans la table de Student. Cette variable est la valeur

limite de t pour n-1 degrés de liberté et un risque $\alpha/2$.

Aussi, en utilisant un test d'hypothèse bilatéral t, il est possible de dire si le biais est significatif ou non. Si $-t_{1-\alpha/2, n-1} \leq t \leq t_{1-\alpha/2, n-1}$ il n'y a pas de biais dans la mesure.

✱ *Test de reproductibilité au niveau Experts*

Ce test a été réalisé avec quinze pièces. Comme dans le test précédent et pour chacune d'entre elles, l'anomalie était identifiée afin de garantir l'évaluation de la même anomalie par l'ensemble des experts. Les experts ont évalué individuellement les anomalies. A chaque anomalie, l'expert devait donc l'évaluer en lui donnant une intensité de 1 à 6.

Le Tableau 13 montre les résultats obtenus à l'issue de ce test.

Anomalies	Expert 1	Expert 2	Expert 3	Intensité
1	5	5	5	5
2	5	5	5	5
3	6	6	6	6
4	2	3	3	3
5	6	6	6	6
6	3	3	5	5
7	5	3	6	6
8	6	6	6	6
9	6	6	6	6
10	6	4	4	4
11	4	3	4	4
12	3	4	3	3
13	3	4	3	3
14	5	4	5	3
15	2	2	2	2
Moyenne	4.46667	4.26667	4.6	4.466667
Ecart type	1.50555	1.33452	1.35225	1.407463
t (Student)*	0	-0.5804	0.38188	
$t_{1-\alpha/2, n-1}$	2.145	2.145	2.145	
Aptitude	Ok	ok	ok	

* le t (student) était calculé sur les écarts entre l'expert et la référence, donc sur les z.

Tableau 13 : Test de reproductibilité des experts

Afin d'obtenir une valeur dite juste, les experts ont été dans une seconde étape, réunis après avoir individuellement évalué les pièces. Lors de cette séance, les experts tentaient de se mettre d'accord sur une intensité commune et consensuelle à donner concernant l'évaluation de la pièce (en cas de profond désaccord entre experts, la pièce était automatiquement retirée du test).

Le Tableau 13 montre à la fois les évaluations individuelles mais aussi les valeurs communes prises en référence.

Aussi, au vu des résultats décrits dans le Tableau 13, nous pouvons en conclure que les experts se sont bien appropriés la méthode d'évaluation puisque les résultats confirment une bonne reproductibilité des évaluations par rapport à la référence.

✱ **Test de reproductibilité au niveau Sujets "NAIFS"**

Afin de voir l'intégration d'une telle démarche de contrôle chez des sujets naïfs, nous avons réalisé une évaluation avec les mêmes pièces qu'auparavant sur certains sujets. Ces quinze sujets ont suivi une formation théorique de 20 minutes sur l'utilisation de la grille, puis ont été mis en condition de contrôle et d'utilisation de la grille d'intensité. Les quinze pièces leur ont donc été présentées individuellement avec toujours sur chacune l'anomalie identifiée. A chaque anomalie, le sujet naïf mais informé de la démarche doit donc l'évaluer en lui donnant une intensité de 1 à 6.

Nous avons obtenu les résultats présentés dans le Tableau 14.

Anomalies	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	PPSA
1	5	5	3	4	5	6	6	6	5	4	5	1	6	6	5	5
2	3	4	4	2	4	6	4	4	5	5	5	3	5	6	5	5
3	6	6	5	6	6	6	6	5	6	6	6	2	6	6	6	6
4	4	4	4	2	4	4	6	2	4	5	2	1	5	2	4	3
5	6	6	6	6	6	6	6	5	6	6	6	6	6	6	6	6
6	5	5	2	3	5	6	5	1	5	5	2	1	5	1	1	5
7	5	5	2	3	5	6	1	2	3	3	3	3	6	4	5	6
8	2	2	4	3	3	5	2	2	6	3	2	3	5	3	3	6
9	6	6	4	6	6	6	4	6	6	3	5	3	6	6	6	6
10	4	3	4	6	6	6	4	6	4	6	6	6	6	6	4	4
11	6	3	4	6	3	3	5	4	4	3	2	1	6	6	2	4
12	5	5	2	6	6	1	4	6	2	5	2	1	5	5	3	3
13	2	2	2	2	2	5	4	1	2	3	3	3	2	2	4	3
14	4	4	2	3	4	5	3	1	4	6	6	3	6	5	6	3
15	3	3	2	2	1	3	5	2	3	2	1	1	2	2	4	2
Moyenne	4.4	4.2	3.33	4	4.4	4.93	4.33	3.53	4.33	4.33	3.73	2.53	5.13	4.4	4.27	4.467
Ecart type	1.4	1.37	1.29	1.77	1.59	1.53	1.5	2.03	1.4	1.4	1.87	1.68	1.36	1.88	1.53	1.407
t (Student) *	-0.2	-0.8	-3.4	-1	-0.2	1.18	-0.3	-1.8	-0.4	-0.4	-1.5	-4.4	1.9	-0.1	-0.5	
$t_{1-\alpha/2, n-1}$	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	
Aptitude	ok	ok		ok	Ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok		ok	ok	ok	

* le t (student) était calculé sur les écarts entre l'expert et la référence donc sur les z.

Tableau 14 : Test de reproductibilité des sujets naïfs

Comme pour les experts, les résultats du test ont montré d'excellents résultats sur la capacité des sujets naïfs à utiliser la grille d'intensité (13 ont été jugés aptes à utiliser la grille d'intensité après une formation théorique, rappelons le, limitée à 20 minutes).

La phase 4 c'est-à-dire l'utilisation de la démarche sera développée dans le chapitre 5 par une application concrète dans l'entreprise Patek Philippe SA.

3 LE CONTROLE VISUEL : DEUX EXPERTISES

Dans la partie précédente, il s'agissait d'utiliser l'analyse sensorielle pour proposer une démarche permettant d'évaluer l'anomalie perçue. L'objectif que nous nous étions fixé était de rendre homogène les résultats des évaluations réalisées des produits, à la fois en termes de répétabilité et de reproductibilité.

L'atteinte de cet objectif est cependant conditionnée par la nécessité de percevoir correctement les anomalies. En effet, même parfaitement au point et bien comprise par les sujets, la méthode d'évaluation d'une anomalie reste tout de même inopérante si cette anomalie n'a pas été au préalable perçue. Cette capacité à percevoir les anomalies n'est cependant, nous le verrons, pas si simple à obtenir. Il faut également qu'un ensemble de conditions soient réunies lors d'un contrôle visuel pour que cette perception puisse s'opérer normalement.

Nous détaillerons ici les principaux facteurs impactant cette capacité à percevoir les anomalies et proposerons la combinaison idéale de facteurs améliorant leur perception.

Si la perception des produits est importante dans le contrôle visuel, leur évaluation est tout aussi importante. Comme la perception, l'évaluation des produits n'est pas simple à réaliser si l'on considère qu'il y a généralement une part importante de subjectivité dans l'interprétation des anomalies. Nous détaillerons les facteurs impactant l'évaluation des anomalies et décrirons comment améliorer cette évaluation lors d'un contrôle visuel.

3.1 LE PROCESSUS DU CONTROLE VISUEL

Le contrôle visuel requiert donc deux expertises. La première, que nous désignons par expertise de perception, est mise en œuvre pour repérer l'anomalie ou les anomalies sur le produit contrôlé. La seconde est une expertise d'évaluation dont la mise en œuvre va permettre au sujet d'estimer la gravité de ces anomalies perçues et ainsi de décider de la conformité ou de la non-conformité du produit.

Ces deux expertises sont distinctes et, nous le voyons sur le terrain, parfois indépendantes. Certains sujets possèdent ainsi une capacité reconnue et avérée dans la détection des anomalies mais se révèlent parfois totalement inaptes lorsqu'il s'agit ensuite pour eux d'évaluer ces anomalies. La réciproque, nous l'avons également constaté, est également vraie.

Pour prendre en compte cette distinction claire entre ces deux expertises, nous avons structuré le processus de contrôle visuel des produits en trois étapes : percevoir l'anomalie, la quantifier et la juger (Figure 37). Ces étapes, composées chacune de plusieurs actions, s'enchaînent pour délivrer, comme résultat de ce processus, une décision concernant l'acceptabilité ou non du produit.

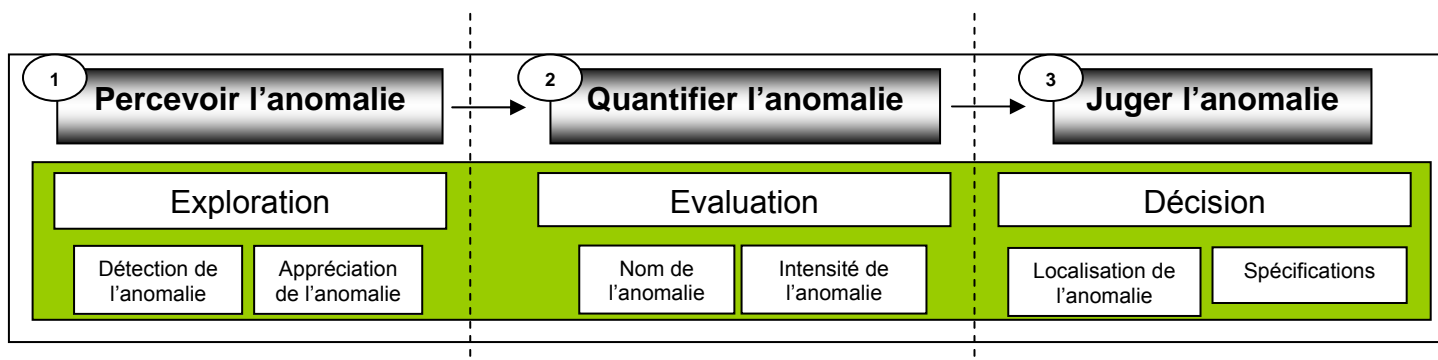


Figure 37 : Le processus de contrôle visuel

L'étape *Percevoir l'anomalie* se compose de deux actions, la première détectant l'anomalie et la seconde appréciant l'anomalie.

L'étape *Quantifier l'anomalie* se compose de deux actions, la première nommant l'anomalie, la seconde quantifiant son intensité.

Enfin, l'étape *Juger l'anomalie* se compose de deux actions, la première précisant l'endroit où a été vue l'anomalie, la seconde concluant, à partir des spécifications définies pour ce produit, sur l'acceptabilité ou non du produit.

La Figure 37 montre ainsi les deux expertises requises pour effectuer un contrôle visuel. L'expertise de perception se réfère à la première étape, tandis que l'expertise d'évaluation se réfère à la seconde. L'étape de décision finale intervient après ces deux étapes d'expertises. Il est nécessaire de préciser que cette dernière étape n'est pas une étape d'expertise car le sujet ne fait plus intervenir sa subjectivité. Il se réfère à des niveaux d'acceptation, i.e. de tolérance admise. La variabilité créée par le sujet ne semble donc pas possible dans cette étape.

Tout contrôle doit être réalisé en respectant l'enchaînement de ces trois étapes et, surtout, en distinguant parfaitement l'exécution de chacune de ces trois étapes. Bien souvent en effet, nous l'avons constaté que lors de plusieurs audits effectués dans l'entreprise, les contrôleurs ont tendance parfois à regrouper la deuxième et troisième étape, donnant ainsi une décision sur la conformité du produit (i.e. *Juger l'anomalie*) avant même d'avoir mesuré l'intensité de cette anomalie (i.e. *Quantifier l'anomalie*). Cela explique une partie de la variabilité des résultats du processus de contrôle qui a été parfois constatée.

3.2 LA PERCEPTION DANS LE CONTROLE VISUEL

3.2.1 LA DIFFICULTE DE BIEN PERCEVOIR

Par une interrogation assez provocatrice - "*Je me demande si la perception n'est pas née dans l'endroit qui a vu l'apparition du premier réflexe : le laboratoire*" - Bernstein [Bernstein, 1930] soulignait le danger d'une perception réalisée sur un objet dans un laboratoire, c'est à dire dans un endroit totalement insensible aux effets de l'environnement dans lequel cet objet a coutume d'évoluer. Une perception n'est jamais passive, hermétique à l'environnement. Elle est en effet plutôt active et généralement très dépendante de l'action qui sera réalisée en fonction de cette perception.

Bergson [Bergson, 1934] fut l'un des premiers à définir ce lien entre action et perception, rejoint plus tard par Gibson [Gibson, 1969] et O'Regan [O'Regan, 1992] qui ont démontré par différentes expériences, d'une part, l'existence d'une dépendance entre perception et action, et d'autre part, l'importance de la perception dans l'action.

L'expérience décrite dans [Rensink et al., 1997] permet d'illustrer cette dépendance. Une photo est présentée à un groupe de personnes. Il est demandé à ce groupe de l'examiner et d'imaginer la scène entre les deux personnes présentes dessus (Figure 38).



Figure 38 : Photo présentée au groupe de personnes

Il est vraisemblable que les différentes personnes de ce groupe s'interrogent sur la nature de la discussion du couple, le type de relations que ce couple entretient, etc.

Pendant leur réflexion, une seconde image leur est présentée (Figure 39) et il leur est demandé de rendre compte des différences entre les deux photos présentées.



Figure 39 : Seconde photo présentée

Classiquement, les personnes interrogées ne perçoivent pas de différences entre les deux photos. En effet, leur champ visuel a le plus souvent balayé la première photo en fonction des questions qu'ils se posaient sur le couple, donc avec un champ visuel uniquement très centré sur les deux personnages (traits roses de la Figure 40)

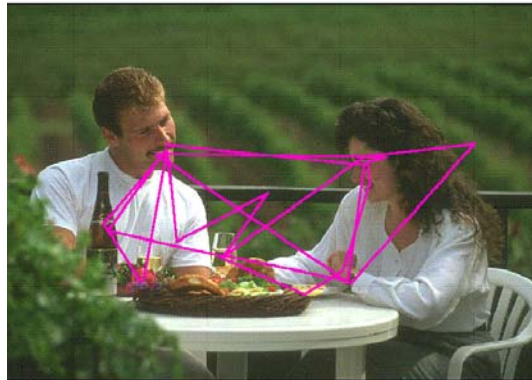


Figure 40 : Premier balayage du regard

Au bout de 10 secondes, le champ visuel a parcouru le chemin présenté dans la Figure 41 :

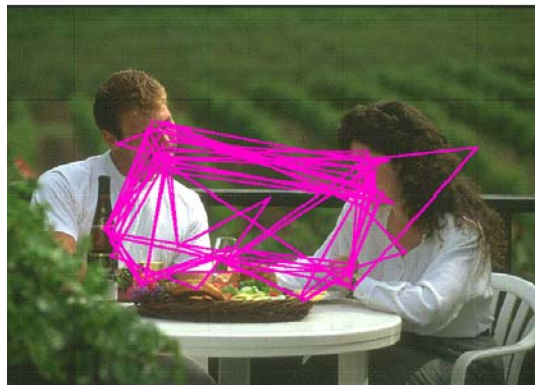


Figure 41 : Balayage du regard après 10 secondes

Leur questionnement a donc totalement guidé leur exploration au point de ne pas les amener à percevoir la modification de la hauteur de la rambarde sur la seconde photo.

Cette expérience illustre toute la difficulté de percevoir correctement. La perception n'est ainsi pas le résultat d'une vision scrutant de manière exhaustive l'ensemble des détails de l'objet observé. Elle est plutôt dépendante d'une action (le questionnement dans l'exemple) impactant sur la manière dont l'objet va être exploré. Elle fait donc appel à une expertise bien spécifique.

Cette expérience permet de montrer que la perception n'est pas seulement le résultat de la vision. En effet, même si les sujets n'ont pas de problème d'acuité visuelle, les modifications d'une image dans un instant très court ne sont pas perçues si leur attention est attirée par un autre événement visuel.

Cette difficulté à bien percevoir est également présente dans un contrôle visuel de produits dans lequel le jugement d'un produit requiert une excellente perception des anomalies présentes sur ce produit.

Mais comment s'assurer que toutes les anomalies d'un produit ont été perçues et correctement perçues ? Certes l'acuité visuelle est un élément déterminant, mais ce n'est pas le seul élément à pouvoir garantir une parfaite perception. La Figure 42 montre par exemple qu'une anomalie peut être perçue différemment selon l'angle d'observation choisi.



* Le point rouge sur la photo indique la localisation de l'anomalie

Figure 42 : Exemple de deux perceptions différentes lors d'un contrôle visuel

Il est probable qu'un positionnement du produit sous un certain angle (photo de gauche de la Figure 42) n'aura pas permis au contrôleur de percevoir l'anomalie alors que le positionnement du même produit sous un autre angle (photo de droite) lui aura permis de repérer l'anomalie et de déclarer le produit comme non conforme. La photo de gauche illustre un *effet lumière* (voir paragraphe 2.3.5.2). En effet, l'anomalie n'est pas visible sous un *effet brillance* alors que sous un angle quelconque l'anomalie est parfaitement visible. Notons que la zone du produit photographié – le fond de la boîte de montre – est une zone plate. Dans le cas d'une zone plus courbe, nous retrouvons les trois effets lumière en même temps sur la même zone ce qui peut, là encore, rendre la perception des anomalies extrêmement délicate.

On peut rajouter à cette difficulté celle résultant du nombre important de types de produits différents à contrôler, chacun d'eux possédant des caractéristiques très différentes liées à leur procédé de fabrication. Cela peut alors se traduire par une attention plus grande du sujet donnée à certaines anomalies très liées aux caractéristiques du produit, et cela au détriment d'une exploration exhaustive de l'ensemble des anomalies possibles. Cela peut suffire à expliquer que certaines anomalies très grossières peuvent échapper à la vigilance d'un sujet. La Figure 43 en montre un exemple.



* A gauche, une pièce exempte d'anomalie, à droite une pièce présentant une anomalie

Figure 43 : Exemple d'une anomalie non perçue lors d'un contrôle visuel

Sur cet exemple de contrôle, le contrôleur n'a pas perçu une anomalie pourtant très visible (absence du chiffre XII) parce son attention s'est focalisée sur la recherche de raies ou coups, anomalies habituelles sur ce type de produits.

Ces deux exemples illustrent bien la difficulté de percevoir correctement des anomalies lors d'un contrôle visuel des produits. Ils montrent ainsi que les conditions de contrôle susceptibles de favoriser cette perception doivent être recherchées et mises en œuvre.

3.2.2 LES FACTEURS INFLUENTS SUR LA PERCEPTION

Cette expertise d'exploration représente la première étape d'un contrôle. Elle est donc incontournable. Il s'agit donc de faire en sorte qu'elle puisse s'effectuer dans les meilleures conditions possibles.

Cela suppose donc d'abord de recenser l'ensemble des facteurs ayant une influence sur la manière dont ces anomalies peuvent ou ne peuvent pas être perçues.

3.2.2.1 LISTE DES FACTEURS INFLUENTS SUR L'ENVIRONNEMENT DE LA MESURE SENSORIELLE

En collaboration avec le groupe avec lequel nous avons conçu l'élaboration de la démarche pour le contrôle visuel (voir début de ce chapitre), nous avons réalisé un diagramme d'Ishikawa pour lister les différents facteurs pouvant impacter la perception des anomalies (en bleu sur la Figure 44). Ces facteurs ont été positionnés par rapport à l'une des catégories se rapportant à un des 5M : *Méthode*, *Milieu*, *Main d'œuvre*, *Moyen*, *Matière*.

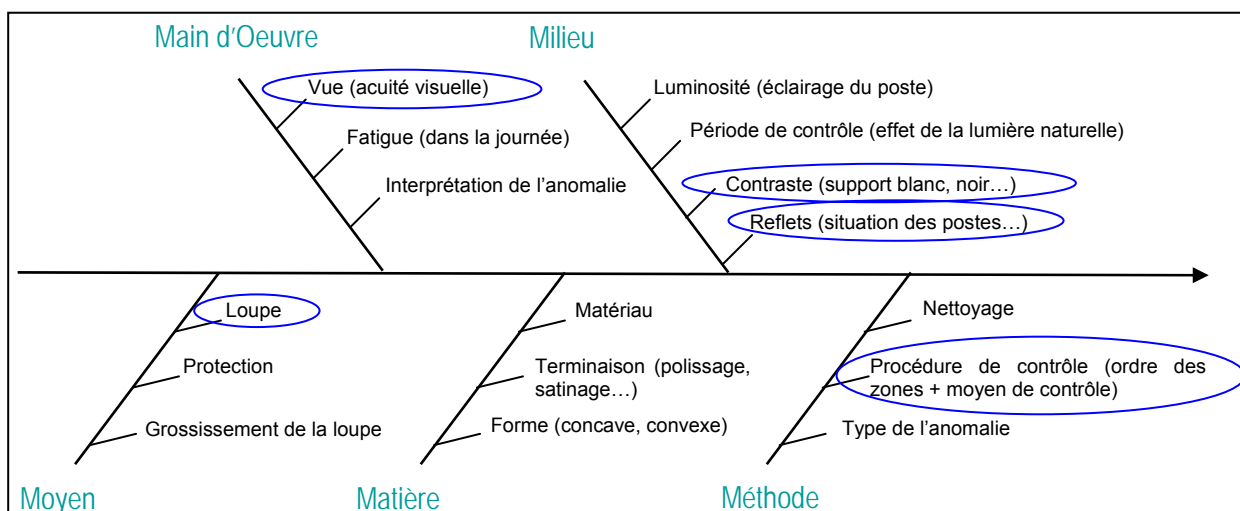


Figure 44 : Recensement des facteurs influents impactant la perception des anomalies

Chacun des 5M regroupe plusieurs facteurs définis par les experts comme étant des facteurs potentiellement influents sur la perception de l'anomalie.

Ainsi la catégorie *Main d'œuvre* regroupe des facteurs sur les aspects classiquement couverts par la problématique de la mesure sensorielle. Ainsi, l'acuité visuelle et la fatigue se réfèrent à la capacité du contrôleur à percevoir l'anomalie. La manière d'interpréter cette anomalie a également un impact sur la manière dont celle-ci est perçue (la perception est, nous l'avons vu précédemment, très liée à l'action qui en résulte).

La catégorie *Milieu* touche essentiellement l'environnement de la mesure puisqu'elle regroupe des facteurs tels que la luminosité (i.e. l'éclairage du poste), la période de contrôle (luminosité différente si le contrôle est réalisé le matin ou en pleine journée), le contraste (fonction du support du produit utilisé lors du contrôle) et les reflets (orientation du poste et positionnement par rapport à une source lumineuse extérieure).

La catégorie *Moyen* fait référence à ce qui est utilisé pour réaliser un contrôle visuel. C'est le cas de la loupe dont l'utilisation ou l'absence d'utilisation peut avoir un effet sur la perception de l'anomalie (certaines anomalies sont plus efficacement perçues à l'œil nu tandis que d'autres nécessitent un recours systématique à la loupe). C'est le cas aussi des moyens de protection (doigt en latex, gants, chiffons antistatiques...) dont l'absence d'utilisation ou l'utilisation d'autres moyens peut générer de nouvelles anomalies qui, de fait, n'auraient pas

dues être perçues. Enfin, le choix du mode de grossissement de la loupe, lorsque celle-ci est utilisée, a un impact évident sur ce qui est perçu lors d'un contrôle visuel.

La catégorie *Matière* regroupe les facteurs se rapportant aux caractéristiques techniques du produit contrôlé comme le type de matériau, les différentes terminaisons du produit lors de sa fabrication ou encore sa forme.

Enfin, la catégorie *Méthode* regroupe les facteurs faisant référence à la manière dont le contrôle est effectué comme le type de nettoyage effectué pour effectuer le contrôle, la procédure de contrôle appliquée ou le type d'anomalie à percevoir.

3.2.2.2 FACTEURS INFLUENTS SUR L'ENVIRONNEMENT DE LA MESURE SENSORIELLE

Un plan d'expérience fractionnaire a permis d'évaluer les effets des facteurs jugés comme étant les plus significatifs d'après les experts parmi l'ensemble des sources de variabilité. Les facteurs évalués sont entourés en bleu dans la Figure 44.

Huit sujets ont ainsi exploré dix produits de références différentes en modifiant à chaque fois les conditions de ces contrôles. Chaque sujet a été amené à ne jamais contrôler plusieurs fois la même pièce, et ceci de manière à éviter que sa perception soit influencée par celle obtenue dans d'autres conditions de contrôle précédentes (ainsi, le sujet n°1 a contrôlé la pièce 1 sous les conditions 1, la pièce 2 sous les conditions 2, etc.)

Le Tableau 15 montre les valeurs qui ont été affectées à ces facteurs durant les différents essais.

Notions testées	Facteurs testés	Valeurs possibles	
Moyen	Aide visuelle	loupe	oeil
Main d'œuvre	Age de la personne	25-30 ans	+45 ans
Méthode	Procédure	avec	sans
Milieu	Contraste	sous main blanc	sous main noir
	Reflets	cabine	poste habituel

Tableau 15 : Définitions des valeurs possibles pour les facteurs testés

Concernant le facteur *Acuité visuelle* de la catégorie Main d'œuvre, opérer des tests ophtalmiques sur des contrôleurs dans un contexte industriel en place nous a paru peu souhaitable. Nous avons préféré former deux groupes de sujets, le premier composé de sujets d'un âge compris entre 25 et 30 ans et possédant une bonne acuité visuelle (même corrigée par des lunettes ou lentilles de contact), le second groupe composé de sujets d'un âge supérieur à 45 ans et ayant des problèmes d'acuité visuelle.

Dans ces différentes conditions, les sujets testés ont dû décrire l'ensemble des anomalies qu'ils percevaient. Pour ce test, nous avons fait l'hypothèse que la totalité des anomalies sur les dix produits avaient probablement été perçues par les huit sujets. La réponse étudiée est donc le pourcentage d'anomalies perçues par pièce, sous chaque condition.

Le Tableau 16 montre les résultats obtenus à l'issue de ce test. Ces résultats ont permis de confirmer l'importance de fixer des conditions pour le contrôle visuel pour améliorer la perception des anomalies.

	Moyen	Main d'œuvre	Méthode	Milieu		Pièces									
				Contraste	Reflets	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	œil	25-30 ans	avec	sous main blanc	cabine	0,22	0,11	0,2	0,2	0	0,12	0,5	0,27	0,07	0,12
2	œil	25-30 ans	sans	sous main noir	poste habituel	0,44	0,22	0	0,4	0,33	0,18	0,6	0,18	0,21	0
3	œil	+45 ans	avec	sous main blanc	poste habituel	0	0,22	0,2	0	0	0	0	0	0,21	0,12
4	œil	+45 ans	sans	sous main noir	cabine	0,22	0,11	0	0,1	0	0	0,5	0,18	0,14	0,06
5	loupe	25-30 ans	avec	sous main noir	poste habituel	0,22	0,67	0,6	0,5	0,33	0,88	0,7	0,45	0,86	0,65
6	loupe	25-30 ans	sans	sous main blanc	cabine	0,33	0,11	0,2	0,1	0,67	0,06	0,6	0,09	0,07	0,12
7	loupe	+45 ans	avec	sous main noir	cabine	0,78	0,11	0,4	0,3	0,33	0,12	0,3	0,64	0,5	0,06
8	loupe	+45 ans	sans	sous main blanc	poste habituel	0,22	0,33	0,2	0,1	0	0,24	0,2	0,18	0,43	0
Total des anomalies perçues						9	9	5	10	3	17	10	11	14	17

Tableau 16 : Résultats des anomalies perçues par pièce sous certaines conditions (en %)

Par exemple, le produit n°1 a été contrôlé par les 8 sujets qui ont trouvé au total 9 anomalies différentes sur ce produit. Le sujet N°1 a détecté 2 anomalies dans les conditions imposées, soit 22% (2 sur 9) des anomalies totales constatées sur le produit.

La Figure 45 donne le graphe des effets. Les colonnes C1, C2, C4, C5 et C7 correspondent aux facteurs étudiés, les colonnes C3 et C6 correspondent à des interactions non significatives.

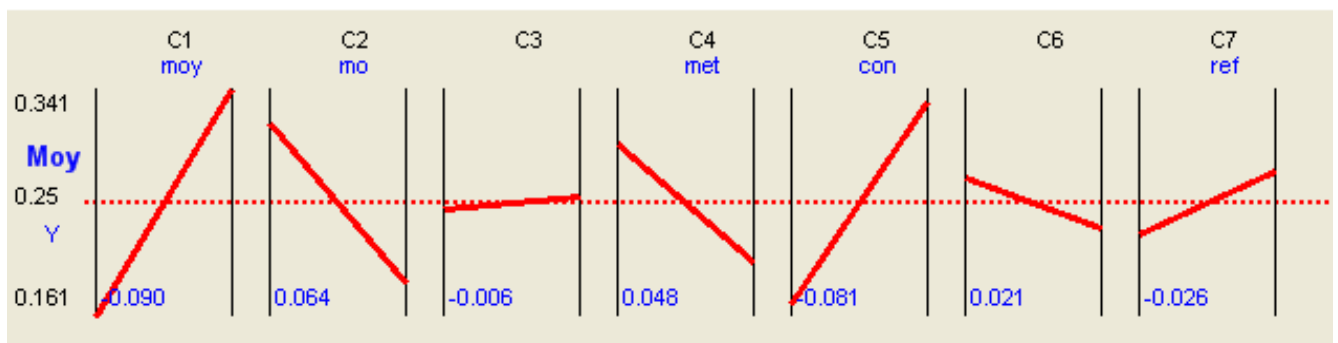


Figure 45 : Résultats de l'analyse de la variance

A partir de ces résultats (Figure 45), une analyse de la variance a permis de conclure que sur les cinq facteurs testés, quatre étaient significatifs sur la réponse :

- Pour la catégorie *Main d'œuvre*, le facteur *Acuité visuelle* (25-30 ans ou +45 ans)
- Pour la catégorie *Méthode*, le facteur *Procédure* (Avec ou Sans)
- Pour la catégorie *Milieu*, le facteur *Contraste* (sous-main Blanc ou Noir)
- Pour la catégorie *Moyen*, le facteur *Loupe* (Avec ou Sans)

3.2.3 AMELIORER LA PERCEPTION LORS D'UN CONTROLE VISUEL

L'objectif du plan d'expérience était bien évidemment de définir les conditions de contrôles optimales pour percevoir un maximum d'anomalies. La meilleure combinaison de facteurs obtenue a été :

- le facteur *Acuité visuelle* avec comme valeur 25-30 ans,
- le facteur *Procédure* avec comme valeur Avec
- le facteur *Contraste* avec comme valeur Sous-main noir
- le facteur *Loupe* avec comme valeur Avec

Le plan d'expérience ainsi mené détermine comme équation polynomiale du modèle retenu :

$$y = 0,25 + 0,09 \times \text{moyen} + (-0,06) \times \text{main d'oeuvre} + (-0,05) \times \text{méthode} + 0,08 \times \text{contraste} + 0,03 \times \text{reflet} \quad \text{Équation 14}$$

D'où, en reprenant les valeurs définies dans la combinaison optimale de facteurs décrite ci-dessous, $y = 0,559$.

Comme il s'agit d'un plan fractionnaire, nous avons effectué une vérification du modèle sur un essai (essai non réalisé dans le plan d'expérience). Le Tableau 17 nous définit donc l'essai de vérification réalisé.

	Moyen	Main d'œuvre	Méthode	Milieu		Pièces									
				Contraste	Reflets	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	loupe	25-30 ans	avec	sous main noir	cabine	0,56	0,67	0,6	0,5	0,67	0,71	0,8	0,55	0,64	0,53

Tableau 17 : Essai de vérification du plan fractionnaire

Nous obtenons alors grâce à ce nouvel essai, une réponse moyenne expérimentale de 0.62, confirmant ainsi la validité de l'Équation 14 avec laquelle nous obtenons 0.53.

Une différence significative de 50% entre le nombre d'anomalies perçues dans la meilleure combinaison de facteurs et la pire (combinaison non réalisée expérimentalement lors du plan d'expérience fractionnaire mais en remplaçant dans l'Équation 14, nous obtenons comme réponse $y = -0.057$).

3.3 L'EVALUATION DANS LE CONTROLE VISUEL

L'expertise d'évaluation est mise en œuvre lors des deux dernières étapes du processus de contrôle (voir Figure 37) : *Quantifier l'anomalie* et *Juger l'anomalie*. La mise en œuvre de cette expertise va permettre au contrôleur de délivrer une décision concernant l'acceptabilité du produit.

3.3.1 LA DIFFICULTE DE BIEN EVALUER

Une première difficulté concernant l'évaluation qui est réalisée lors d'un contrôle visuel relève de l'utilisation même du terme d'*anomalie*.

La première étape du processus de contrôle visuel a permis de percevoir des anomalies. Le terme d'anomalie désigne "*tout phénomène qui s'éloigne de ce qui est considéré comme normal*". Aussi, lors du contrôle, le sujet va percevoir une anomalie puis va l'évaluer et enfin la juger. Le sujet remarque alors en premier lieu une anomalie c'est à dire une différence avec une pièce dite "normale" puis continue la mesure en évaluant cette anomalie. Or si l'anomalie est jugée à la fin du processus d'expertise comme acceptable, cette dernière restera une anomalie. Cependant, si à la fin du processus d'expertise, l'anomalie est jugée comme inacceptable c'est-à-dire ayant une intensité dans la zone de refus, l'anomalie deviendra un défaut. D'après la norme ISO9000, "*un défaut représente la non-satisfaction*".

d'une exigence relative à une utilisation prévue ou spécifiée". Un défaut peut aussi être défini de la manière suivante : *"Absence, manque ou insuffisance de ce qui serait nécessaire"*. Par conséquent, un défaut provoquera immédiatement un échec au contrôle qualité et par conséquent sera automatiquement rebutée.

En conclusion, avant toute mesure, toute anomalie est acceptable. Elle représente un phénomène suspect sur le produit. Après la mesure, cette anomalie devient défaut si elle n'est pas jugée acceptable, et reste anomalie si elle est jugée comme acceptable.

La confusion entre ces deux termes peut parfois expliquer à elle seule la variabilité des résultats de cette étape d'évaluation, certains contrôleurs considérant que toute anomalie est un défaut et n'est donc pas acceptable.

La Figure 46 illustre le cas d'une anomalie relevée sur un produit jugée acceptable par certains contrôleurs et non acceptable pour d'autres.



Figure 46 : Exemple d'une anomalie perçue et quantifiée identiquement mais jugée différemment

Certains contrôleurs considéreront ainsi que toute anomalie dès lors qu'elle est détectée, est inacceptable. D'autres au contraire, en considérant le type d'anomalie, son intensité ou l'endroit où elle se trouve, pourront être amenés à la considérer comme acceptable. Dans les deux cas, la perception de l'anomalie est identique mais son évaluation est différente.

3.3.2 LES FACTEURS INFLUENTS SUR L'EVALUATION

Sur la base du diagramme d'Ishikawa réalisé pour la perception des anomalies, les experts se sont exprimés sur les facteurs pouvant avoir une incidence sur l'évaluation des produits lors d'un contrôle visuel (en vert sur la Figure 47).

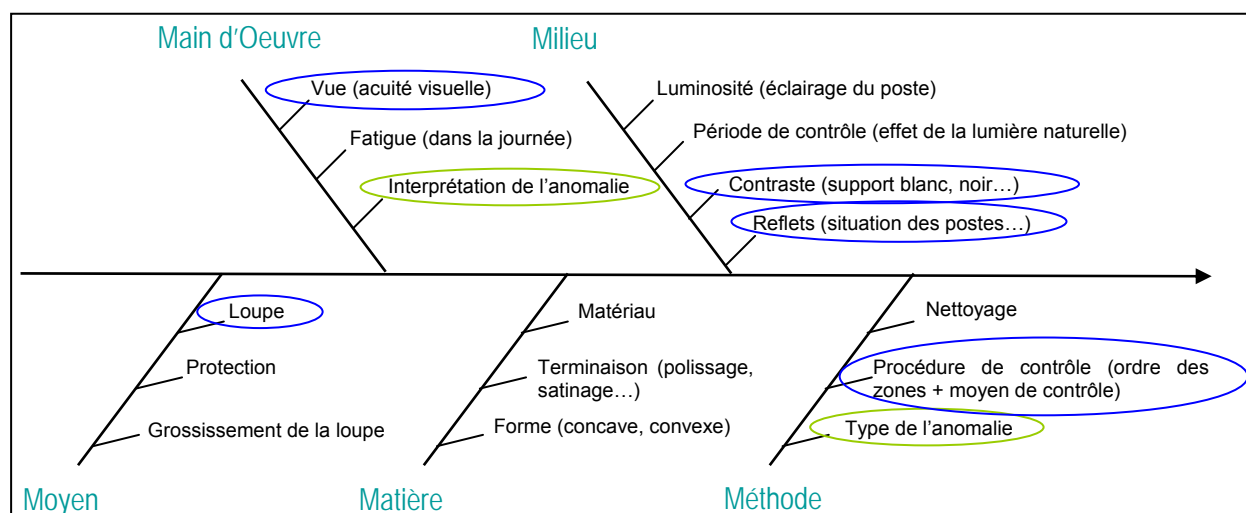


Figure 47 : Recensement des facteurs influents impactant l'évaluation des anomalies

Deux facteurs ont ainsi été considérés par les experts du groupe comme pouvant impacter l'évaluation des produits : le facteur *Interprétation de l'anomalie* dans la catégorie *Main d'œuvre* et le facteur *Type de l'anomalie* dans la catégorie *Méthode*.

3.3.3 AMELIORER L'EVALUATION LORS D'UN CONTROLE VISUEL

La démarche d'évaluation proposée dans ce chapitre présente un intérêt pour améliorer l'évaluation des produits. En effet, elle permet de répondre au premier facteur influent, le type d'anomalie, en proposant au contrôleur une liste prédéfinie d'anomalies susceptibles d'être présentes sur le produit contrôlé. Concernant le second facteur influent, l'interprétation, la méthode propose également une grille d'intensité qui contribue à réduire la subjectivité de l'interprétation qui est faite par le contrôleur concernant cette anomalie.

Après que les contrôleurs aient, à partir de la grille d'intensité proposée, quantifié l'anomalie, ils doivent ensuite juger si le produit est acceptable ou non.

Les experts ont donc défini une table de refus (Tableau 18) précisant, en fonction de l'intensité de l'anomalie et de la zone où cette anomalie a été perçue, le jugement à délivrer sur l'acceptabilité du produit. Le jugement est ainsi déduit d'un raisonnement très objectif et non plus fondé sur la subjectivité du sujet.

Localisations	Anomalies	
	Marque	...
Dessus	3	4
...	4	4

**l'intensité indiquée dans la table indique la limite inférieure de la zone de refus (limite incluse)*

Tableau 18 : Extrait de la table de refus

4 CONCLUSION

L'objectif de ce chapitre a été de présenter le principe, la démarche et l'application de l'évaluation humaine dans le contexte d'un contrôle qualité.

En effet, nous avons pu constater que le contrôle visuel était abandonné très souvent au bon vouloir de la personne qui devait l'effectuer. Ne définissant aucune règle de contrôle, aucun standard sur la manière de l'effectuer, aucune tolérance d'acceptabilité, ce contrôle est laissé au détriment d'un contrôle typiquement dimensionnel. Mais pourquoi ?

La réponse est simple : parce que ce dernier, on sait le faire ! Les règles sont déjà connues, les standards conventionnés et les tolérances chiffrées. En effet, le contrôle dimensionnel n'est plus à organiser, il est entièrement conventionné.

Mais alors, quelle est la difficulté du contrôle visuel ?

La réponse est simple : le contrôle visuel est subjectif et donc est basé sur des grandeurs non mesurables. De ce constat, notre objectif est clair rendre mesurable ce qui ne l'est pas. La démarche que nous proposons alors, se base sur des méthodes proposées en analyse sensorielle. Très souvent utilisées lors de mesures hédoniques afin d'analyser les attentes clients, leurs besoins..., il nous fallut d'abord adapter ces méthodes à notre contexte bien spécifique.

Nous avons cherché de plus à développer une démarche qui soit la plus générique possible pour être utilisable à tout contrôle où une évaluation humaine est requise. Chaque étape de cette démarche a été testée.

Hormis cette notion de contrôle non mesurable, une autre difficulté, qui peut aussi être une conséquence de ce contrôle, peut être alors vue : la variabilité des résultats des contrôles visuels.

Afin de réduire la variabilité induite par une évaluation humaine, notre proposition a donc été de décomposer la mesure en trois étapes: l'exploration, l'évaluation et la décision.

Les deux premières étapes nécessitent qu'une expertise, tant dans l'exploration que dans l'évaluation, soit acquise. La dernière étape requiert quant à elle que des règles d'acceptation précises des produits soient prédéfinies par les experts.

Ce chapitre a donc détaillé les propositions que nous faisons pour ces trois étapes :

- l'exploration : nous y répondons en analysant l'environnement et l'utilisation de l'instrument de mesure
- l'évaluation : nous développons une démarche construite à partir de méthode d'analyse sensorielle
- la décision : nous définissons une règle d'acceptation ou de refus suivant les bonnes pratiques

En intervenant à la fois sur ces trois étapes, la variabilité du jugement final sur le produit peut être significativement réduite. Cependant, comment garantir une stabilité du jugement dans le temps ? Comment garantir une stabilité dans chaque évaluation ? Comment garantir une stabilité pour chaque évaluateur ? Comment prévenir toute dérive possible ? Nous donnons des réponses à ces questions dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

Vers une métrologie de l'Analyse Sensorielle...

1 INTRODUCTION

Dans toute démarche de contrôle qualité, la variabilité des résultats donnés par l'instrument de mesure doit être prise en considération. Déterminer la capabilité de l'instrument de mesure est en effet un facteur important dans la recherche d'amélioration de la qualité des produits.

Pour un contrôle visuel des produits, c'est l'homme (le sujet ou l'expert) qui fait office d'instrument de mesure. Celui-ci doit en effet, conformément à la démarche que nous avons décrite précédemment, contrôler le produit, l'évaluer et juger s'il est acceptable ou non. La mesure qu'il effectue pouvant être subjective, la variabilité des résultats obtenus par cette mesure peut donc être importante et doit, autant que possible, être réduite.

Dans le chapitre précédent, nous avons vu que la subjectivité à l'origine de cette variabilité pouvait intervenir durant les trois étapes d'un processus de contrôle :

- l'exploration, i.e. la perception de l'anomalie par le sujet, qui vise à préparer la mesure
- l'évaluation, i.e. la quantification de l'anomalie, qui effectue le mesurage
- la décision, i.e. le jugement de l'anomalie, qui fournit une réponse à la mesure.

Maîtriser la subjectivité, et donc réduire la variabilité des résultats de la mesure, suppose que ces trois étapes soient considérées séparément. C'est le principe que nous avons retenu dans la démarche que nous proposons, basée sur les théories de l'analyse sensorielle [Philippe et al., 2002] [Meilgaard et al., 1999] [Roudaut et al., 2002] [SSHA, 1998].

Dans les différentes études que nous avons pu examiner (par exemple, [CRIN, 1997], [Giboreau et al., 2001]), les contrôles sont le plus souvent réalisés dans un contexte très ponctuel (par exemple, ce que veut le client à l'instant où l'étude est réalisée). Ce qui importe en effet dans ce cas, ce sont les résultats d'une mesure à un instant bien précis. La variation des résultats qui peut exister entre deux instants différents pour un même sujet ou entre sujets différents à un même instant est de fait très rarement prise en considération. La maîtrise des résultats dans la durée ainsi que dans l'espace est ainsi peu abordée et le problème de la variabilité des résultats est généralement ignoré. Et dans le cas où celle-ci est considérée, seule une variabilité globale est examinée et l'identification des facteurs à

l'origine de cette variabilité n'est généralement pas effectuée. Seule la variabilité sur la décision d'accepter ou de refuser le produit est considérée. La variabilité pouvant être créée tout au long du processus de contrôle n'est donc pas examinée et les causes de cette variabilité ne peuvent alors pas être identifiées.

Nos travaux que nous détaillons dans ce chapitre ont donc consisté à proposer des solutions pouvant contribuer à :

- quantifier la variabilité des résultats de mesure
- identifier, le cas échéant, les causes de cette variabilité
- réduire la variabilité et pérenniser le résultat obtenu.

Pour analyser la variabilité des résultats des mesures, le test R&R aux attributs est généralement proposé. Ce test a fait l'objet d'améliorations constantes au fil des versions successives proposées par l'AIAG¹ [AIAG, 1998] [AIAG, 2002]. Nous verrons dans ce chapitre que ce test, repris par d'autres comme [WIN, 2003], répond seulement à une décision globale (comme par exemple, *Conforme ou Non conforme*) et se révèle donc peu adapté à notre démarche qui fait intervenir toutes les étapes du processus amenant à la décision finale. Notre objectif est en effet de comprendre et de déterminer les causes de la variabilité afin de pouvoir la réduire quand cela est possible. Dans ce chapitre, nous proposons donc un nouveau test, désigné par test R²&E², composé à la fois d'une première évaluation globale basée sur le test Kappa de Cohen, mais également basé, pour expliquer la variabilité constatée, sur une évaluation des deux expertises (exploration et évaluation) requises pour la mesure. L'objectif de ce nouveau test est ainsi d'évaluer à la fois la répétabilité et la reproductibilité de l'exploration et de l'évaluation. Nous montrerons comment ce test aide à localiser les causes de la variabilité des résultats de mesure.

Enfin, nous montrerons l'organisation devant être mise en place pour maintenir, et au besoin réduire, un niveau de variabilité des résultats de mesure. L'organisation que nous proposons est basée par une analogie avec ce qui est fait déjà en métrologie dimensionnelle. Nous montrerons en particulier comment la variabilité peut être diminuée en mettant en place un processus de formation, d'étalonnage et de suivi basé essentiellement sur l'instrument de mesure comme l'entend toute métrologie.

2 MESURE DE LA PERFORMANCE DE L'INSTRUMENT DE MESURE

2.1 LE TEST R&R : PRINCIPES ET LIMITES

Pour améliorer la qualité de leurs produits, les entreprises sont nombreuses à mettre en place des contrôles à différents stades de leur processus de fabrication. Parmi ces contrôles, les contrôles visuels occupent maintenant une part de plus en plus importante. L'entreprise doit en effet répondre aux exigences des clients, de qualité perçue mais aussi de concurrence de marché [Mojet et al., 2005].

Un contrôle visuel induit des résultats parfois très variables puisqu'il fait intervenir une interprétation personnelle du sujet qui doit juger, en fonction du ou des anomalies qu'il perçoit, de la conformité ou non du produit contrôlé. Pour évaluer cette variabilité, un test R&R peut être utilisé. Ce test [Pillet, 2005] consiste à évaluer la dispersion de l'instrument de mesure, tant en terme de répétabilité que de reproductibilité, afin de déduire la capacité du processus de contrôle. Les causes de cette dispersion peuvent ensuite être identifiées (instrument de mesure, opérateur, cote de la pièce, etc.)

L'application d'un test R&R s'appuie sur deux principaux référentiels. Le premier rassemble les spécifications de Ford basées sur les principes proposés par Charbonneau [Charbonneau et al., 1978]. Ces principes prennent en compte à la fois la répétabilité et la reproductibilité de l'opérateur dans la dispersion de l'instrument de mesure. Le second référentiel utilisé rassemble les recommandations de la norme CNOMO [CNOMO, 1991], préconisant, en plus de la répétabilité, d'estimer la justesse de l'instrument de contrôle.

Le test R&R, initié par Charbonneau, puis repris et complétés dans différents articles [Wheeler, 1989] et normes [CNOMO, 1991], s'est d'abord fondé sur des mesures exclusivement quantitatives pour évaluer la capacité du moyen de mesure. Avec la multiplication des contrôles visuels basés sur les aspects plus subjectifs (voir chapitre 2), ce test R&R a ensuite été adapté pour être utilisé avec des mesures qualitatives [Pillet, 2005], [AIAG, 1998], [Burdick et al., 2003] etc... Ce test, appelé test R&R aux attributs, se base ainsi, par exemple, sur des données telles que *Conforme/Non conforme*, *Apte/Inapte*, etc.

Nous rappelons ici les principes d'un test R&R classique et d'un test R&R aux attributs. Nous montrons ensuite les limites que nous avons relevées concernant ce test lorsqu'il doit être utilisé dans le contexte particulier d'un contrôle visuel des produits.

2.1.1 PRINCIPES D'UN TEST R&R

Un test R&R a pour objectif d'analyser le moyen de mesure utilisé lors d'un contrôle. Il permet ainsi, d'une part de s'assurer que ce moyen de mesure est bien choisi, et d'autre part de décider si la variabilité de la mesure qui est obtenue est acceptable ou non. La variabilité ainsi constatée peut en effet avoir plusieurs conséquences dont celle, très coûteuse de générer des anomalies comme *Non-conformes* alors qu'elles pourraient être jugées *Conforme*, ou encore, bien d'omettre des anomalies qui non pas étaient perçues lors du contrôle.

Comme recommandé par l'AIAG [AIAG, 1998], la distribution des résultats obtenus qui est utilisée pour décrire les variations du système de mesure permet également de caractériser plusieurs aspects du contrôle. :

- le pouvoir de discrimination de l'instrument de mesure : il s'agit de la capacité de l'instrument de mesure à détecter de petites variations. Des règles de base peuvent donc être définies sur la résolution de l'instrument à utiliser afin que ce dernier soit compatible avec la mesure à effectuer.
- l'efficacité de l'instrument de mesure : il s'agit d'évaluer l'instrument de mesure dans sa mesure. Le nombre de décisions correctes va donc être évalué en fonction du nombre total de décisions prises.

- la capabilité de l'instrument de mesure : il s'agit de réaliser une évaluation de la variation des erreurs de mesure (aléatoires et systématiques) basées sur une évaluation à court terme du système de mesure.
- la répétabilité de la mesure : elle correspond à la variation de la mesure obtenue pour une même caractéristique sur un même produit avec le même instrument de mesure mais à différents instants.
- la reproductibilité de la mesure : elle correspond à la variation des moyennes des mesures réalisées par différents sujets utilisant le même moyen de mesure et dans les mêmes conditions afin de mesurer la même caractéristique du même produit.
- le biais de la mesure : il s'agit de l'écart systématique constaté entre la moyenne des mesures observées et la valeur juste.
- la linéarité sur la plage d'utilisation du processus : c'est la différence de biais sur l'ensemble de la plage d'utilisation du processus de mesure.
- la stabilité du processus au cours du temps : elle caractérise la différence de biais constatée dans le temps

Le test R&R aux attributs permet quant à lui, nous l'avons dit précédemment, de traiter des données qualitatives. Dans le manuel de référence intitulé *Measurement Systems Analysis*², le test R&R aux attributs est défini comme un test où chaque produit est comparé par rapport à un ensemble de limites avec le but de savoir s'il faut l'accepter ou non. Ce test n'indique donc en aucun cas si le produit est bon ou n'est pas bon, mais seulement s'il doit être accepté ou rejeté [AIAG, 1998].

Comme dans le cas d'un test R&R classique, il est nécessaire d'avoir une valeur de référence (pouvant aussi être appelée spécification) afin de définir la cible à atteindre. Comme les mesures relevées, cette valeur de référence est de nature qualitative. Par exemple, si les mesures du test prennent la valeur *Conforme* ou *Non conforme*, la valeur de référence prendra également la valeur *Conforme* ou *Non conforme* et sera attribuée par un expert (cet expert peut être un client ou toute personne telle que définie par l'analyse sensorielle).

Les valeurs qui sont analysées lors d'un test R&R aux attributs sont obtenues à partir d'une évaluation de chaque produit par au minimum deux sujets. Les sujets doivent réaliser l'évaluation de ce produit au moins deux fois à des périodes différentes.

Comme dans le cas d'un test R&R, ces évaluations permettent donc de définir :

- la répétabilité, c'est-à-dire la capacité d'un sujet à produire le même résultat après deux mesures successives d'un même produit.
- la reproductibilité, c'est-à-dire la capacité de plusieurs sujets à aboutir au même résultat après la mesure d'un même produit.

Cette répétabilité et cette reproductibilité sont donc évaluées entre sujets, mais aussi, et c'est l'un des points forts de ce test, avec la valeur référence définie par l'expert.

La 2^{ème} édition du *Measurement Systems Analysis* [AIAG, 2002] recommandent l'utilisation de deux méthodes lors de l'application de ce test : la méthode analytique (en anglais, *Analytic Method*) et la méthode d'analyse des risques (en anglais *Risk Analysis Method*).

Ces deux méthodes sont en effet préconisées dans le cas de données qualitatives. Elles sont d'ailleurs reprises par beaucoup d'acteurs confrontés à la même problématique [Windsor, 2003]. Cependant, il est à noter que ce sont des données quantitatives transposées en données qualitatives, telles que *Passe* et *Ne passe pas*, ou *Accepté* et *Non accepté*. Pour chaque produit utilisé pour le test, les valeurs de référence, initialement connues sous une forme quantitative, sont ainsi transcrites sous une forme qualitative.

² Ce document a été créé à l'initiative de Daimler Chrysler Corporation, General Motors Corporation et Ford Motor Company.

Dans le cas de valeurs totalement qualitatives, i.e. sans possibilité d'effectuer au préalable des mesures sur les produits, ces méthodes ne peuvent s'appliquer en totalité. Par exemple, le test R&R aux attributs proposé Pillet [Duert et al., 2005] utilise uniquement la deuxième partie du calcul de l'efficacité des évaluateurs de la méthode d'analyse des risques. Nous détaillons maintenant ces deux méthodes.

✱ *Méthode analytique*

Cette méthode est basée sur les travaux de McCaslin et Gruska [McCaslin et al., 1976]. Elle vise à estimer la répétabilité et le biais de l'instrument de mesure. Elle nécessite pour cela de connaître la tolérance du produit, celle-ci s'exprimant sous la forme d'une limite supérieure, d'une limite inférieure ou d'un intervalle. Des valeurs, notées X_T , approchant cette tolérance et équidistantes les unes des autres sont alors retenues (dans le cas d'intervalle de tolérance, l'étude n'est réalisée que sur l'une des deux bornes).

Les produits sont évalués m fois et un nombre a de ces produits est accepté. Dans [AIAG, 2002], il est préconisé de prendre 8 produits et de répéter 20 fois la mesure ($m = 20$). Un de ces 8 produits devra répondre à la condition $a = 0$ (le produit n'a jamais été accepté), un autre produit devra répondre à la condition $a = 20$ (le produit a toujours été accepté) et les 6 autres produits devront répondre à la condition $1 \leq a \leq 19$. Si cette dernière condition n'est pas remplie, d'autres produits doivent être considérés. Ces nouveaux produits prendront alors pour valeur de référence des valeurs au centre des intervalles créés par les valeurs de l'étude précédente.

Une fois les conditions remplies, la probabilité d'acceptabilité du produit est calculée par la relation suivante :

$$P'_a = \begin{cases} \frac{a+0.5}{m} \text{ if } \frac{a}{m} < 0.5, a \neq 0 \\ \frac{a-0.5}{m} \text{ if } \frac{a}{m} > 0.5, a \neq 20 \\ 0.5 \text{ if } \frac{a}{m} = 0.5 \end{cases} \quad \text{Équation 15}$$

Notons que ces relations sont valables pour $1 \leq a \leq 19$.

Aussi, si $a = 0$, alors $P'_a = 0,025$ pour la plus grande valeur de X_T et si $a = 20$, alors $P'_a = 0,975$ pour la plus petite valeur de X_T .

Sinon dans le cas de plusieurs valeurs X_T pour $a = 0$ et $a = 20$, les valeurs extrêmes sont :

- pour $a = 0$, alors $P'_a = 0$
- pour $a = 20$, alors $P'_a = 1$

Le Tableau 19 en donne un exemple.

X_T	a	P'_a
-0,016	0	0
-0,014	0	0,025
...		
-0,010	20	0,975
-0,008	20	1

Tableau 19 : Valeurs de P'_a pour $a = 0$ et $a = 20$ suivant X_T

Pour chaque X_T testé, on obtient a ce qui permet de calculer P'_a .

En utilisant un papier log-normal et en reportant les données ainsi obtenues et calculées, il sera possible d'obtenir l'ensemble des P'_a pour chaque X_T voulu.

Ceci permettra ainsi de définir X_T ($P'_a = 0,5$) dont nous avons besoin pour l'Équation 16 et X_T ($P'_a = 0,995$) et X_T ($P'_a = 0,005$) pour l'Équation 17.

Le biais et la répétabilité peuvent alors être évalués de la manière suivante :

$$\text{biais} = \text{Limite de la tolérance} - X_T(P'_a = 0.5)$$

Équation 16

$$\text{Répétabilité} = \frac{X_T(P'_a = 0.995) - X_T(P'_a = 0.005)}{1.08}$$

Équation 17

** Le facteur 1,08 est spécifique pour une taille d'échantillon de 20 et a été déterminé au travers d'une simulation de cette approche. [AIAG, 2002]*

Pour déterminer si le biais est significativement différent de zéro, un test de Student est alors réalisé sur les moyennes.

Sweet, Tjokrodjojo et Wijaya dans [Sweet et al., 2005] ont repris cette méthode et l'ont complété en lui adjoignant un modèle probabiliste et des méthodes d'estimation du biais et de la répétabilité. Ils montrent également, en utilisant le principe de la probabilité maximum, l'un des points faibles de cette méthode. En effet, la contribution de la probabilité due aux valeurs $a = 0$ et $a = 20$ est faible par rapport à celle des autres valeurs.

✖ Méthode d'analyse des risques

Cette méthode vise à évaluer les risques d'avoir des décisions fausses ou incohérentes en utilisant, soit l'analyse des tests d'hypothèses, soit la théorie de l'analyse du signal. Cette méthode se base sur l'analyse d'un tableau de données d'entrée faisant intervenir une valeur de référence et les séries de valeurs de plusieurs évaluateurs. Ces données d'entrée sont binaires (1 pour les produits inacceptables, 0 pour les produits acceptables).

L'analyse des tests d'hypothèses permet de comparer les réponses entre évaluateurs mais aussi avec la référence. Pour cela, elle utilise le coefficient Kappa de Cohen [Cohen, 1960] qui a pour objectif de déterminer le niveau d'accord des évaluateurs entre eux, mais également, avec une référence. L'Équation 18 donne donc l'expression de ce coefficient.

$$K = \frac{P_0 - P_e}{1 - P_e}$$

Équation 18

avec

P_o : la proportion d'accord observée.
 P_e : la proportion d'accord aléatoire

Dans [AIAG, 1998], il est proposé que lorsque $K > 0.75$, alors l'accord entre évaluateurs peut être considéré comme Bon à Excellent et lorsque $K < 0.40$, il peut être considéré comme Mauvais. Landis et Koch [Landis et al., 1977] proposent quant à eux un autre classement faisant intervenir davantage de degrés d'interprétation (Tableau 20).

Accord	Kappa (K)
Excellent	$\geq 0,81$
Bon	0,80 - 0,61
Modéré	0,60 - 0,41
Médiocre	0,40 - 0,21
Mauvais	0,20 - 0,0
Très mauvais	$< 0,0$

Tableau 20 : Degrés d'accord et valeurs de Kappa [Landis et al., 1977]

Bien évidemment, les limites de ce classement qui sont proposées peuvent varier selon l'étude réalisée. Par exemple, en psychiatrie où la part d'incertitude est grande, un même accord considéré comme *Modéré* dans le tableau proposé par Landis, pourrait être considéré comme *Excellent*.

Outre ce coefficient de Cohen pour juger de la pertinence des accords des évaluateurs, le document *Measurement Systems Analysis* renseigne également sur la manière de calculer l'efficacité de chaque évaluateur, soit avec les autres, soit avec la référence. Cette efficacité est calculée de la manière suivante :

$$\text{Efficacité} = \frac{\text{nombre de décisions correctes}}{\text{total de produits inspectés}} = \frac{TC}{TI} \quad \text{Équation 19}$$

Cette efficacité peut alors être encadrée de limites à 95% calculées par l'approximation à partir de la loi Bêta [Pillet, 2005]. La loi Bêta est couramment utilisée en analyse du risque pour modéliser des opinions d'experts en raison de sa souplesse et de sa simplicité.

$$95\%LSC = \text{Beta.inverse}\left(\frac{1+0.95}{2}; TI - TP + 1; TP\right) \quad \text{Équation 20}$$

$$95\%LIC = \text{Beta.inverse}\left(\frac{1+0.95}{2}; TP + 1; TI - TP\right)$$

avec

95%LSC : limite supérieure à 95%.

95%LIC : limite inférieure à 95%.

TI : Total inspecté

TP : Total problèmes

TC : Total décisions correctes

Nous proposons alors comme tableau de synthèse :

Evalueurs	% Evalueur			% Référence		
	A	B	C	A	B	C
TI						
TC						
TP						
95% LSC = Beta.inverse($\frac{1+0.95}{2}$; TI - TP + 1; TP)						
Efficacité = $\frac{TC}{TI}$						
95% LIC = Beta.inverse($\frac{1+0.95}{2}$; TP + 1; TI - TP)						

Tableau 21 : Tableau de synthèse sur l'estimation de l'efficacité des évaluateurs

La décision sur l'instrument de mesure concernant son efficacité peut être donnée en se référant au tableau d'acceptabilité suivant [AIAG, 2002] [Pillet, 2005] :

Décision	Efficacité
Acceptable pour l'évaluateur	≥ 90%
Limite acceptable pour l'évaluateur – devant être tout de même améliorée	≥ 80%
Inacceptable pour l'évaluateur – besoin d'amélioration	< 80%

Tableau 22 : Acceptation d'un instrument de mesure selon son efficacité

La théorie de l'analyse du signal fournit quant à elle le moyen d'approximer la capacité du système de mesure (appelée GR&R dans [AIAG, 1998]). La méthode utilise pour cela des valeurs de référence et donc des mesures quantitatives. Celles-ci sont triées par ordre décroissant et la distance entre le dernier produit accepté par tous les évaluateurs et le premier produit rejeté par tous est calculée.

Les distances pour la limite supérieure et la distance pour la limite inférieure sont alors calculées de la façon suivante :

$$d_{LSL} = \text{dernier produit refusé par tous} - \text{premier produit accepté par tous} \quad \text{Équation 21}$$

$$d_{USL} = \text{dernier produit accepté par tous} - \text{premier produit refusé par tous} \quad \text{Équation 22}$$

D'où

$$d = \frac{d_{USL} + d_{LSL}}{2} \quad \text{Équation 23}$$

La capacité GR&R définie comme l'intervalle contenant 99% de la population est alors obtenue à partir de l'équation suivante :

$$GR \& R = 5.15(\bar{R}) / d_2^*,$$

Équation 24

Avec :

\bar{R} : l'étendue moyenne et d_2^* une valeur tabulée tirée de la loi de l'étendue réduite.

× Une différence essentielle

Ces deux méthodes sont donc bien différentes dans leur utilisation mais surtout dans leur concept même. En effet, le type de données d'entrée pour chacun de ces tests est très différent.

En effet, en ce qui concerne la première méthode (*Méthode analytique*), il s'agit d'une méthode basée sur un contrôle au calibre pour une mesure effectuée. Cette méthode fait donc appel à des mesures initialement quantitatives transformées en des mesures dites "qualitatives" du type "Passe/Passe pas". Les limites de tolérance sont quant à elle quantitatives. Cela va donc permettre la transformation des données quantitatives en données qualitatives. Chaque mesure sera donc comparée aux limites de tolérance et ensuite transformée en données du type "Passe/Passe pas".

La seconde méthode quant à elle (*Méthode d'analyse des risques*), représente un contrôle aux attributs. Les données d'entrée de ce test sont purement qualitatives. Elles n'ont donc subi précédemment aucune mesure donnant une réponse chiffrée au test. Les données sont de type "Passe/Passe pas", "Conforme/Non conforme" ... ainsi que les tolérances. Nous assistons à une véritable comparaison entre des mesures et des limites de tolérance de même type.

2.1.2 LIMITES D'UN TEST R&R

2.1.2.1 LES DEUX EXPERTISES

Un test R&R contribue parfaitement à évaluer la reproductibilité et la répétabilité d'un contrôle, et donc à estimer la variabilité qui peut en résulter. Cependant, le test ne permet pas d'identifier ce qui est à l'origine de cette variabilité. Par exemple, lorsqu'un même sujet juge successivement le même produit *Non Conforme* puis *Conforme*, est-ce que c'est parce qu'il n'a pas perçu l'anomalie lors de la première mesure mais l'a perçu lors de la deuxième mesure ? Ou est-ce parce que c'est qu'il a perçu l'anomalie lors des deux mesures mais a considéré cette anomalie comme acceptable lors de la première mesure et non acceptable lors de la seconde ?

De la même manière, lorsque deux sujets jugent différemment le même produit, l'un comme *Non conforme*, l'autre comme *Conforme*, est-ce parce que le premier a perçu l'anomalie et que le second ne l'a pas perçue ? Ou est-ce parce que le second a perçu l'anomalie mais ne l'a pas jugée acceptable ?

La reproductibilité et la répétabilité d'une mesure dépendent donc, d'une part et à la fois, de la capacité du sujet à percevoir l'anomalie et, d'autre part, de sa capacité à juger l'anomalie. Ces deux capacités sont associées à deux expertises [Ericsson et al., 1996] qu'il s'agit, comme nous avons pu le voir au chapitre 2, de distinguer et d'aborder de manière séparée [Guerra et al., 2006] :

- l'expertise d'exploration : elle se réfère à la capacité d'un sujet à détecter l'ensemble des anomalies sur le produit et à l'apprécier suivant sa perception aux conditions d'observation définies auparavant.
- l'expertise d'évaluation: elle se réfère à la capacité du sujet à donner le nom et l'intensité de l'anomalie définie pendant l'étape d'exploration.

Le test R&R, tel qu'il est actuellement préconisé, ne répond pas aux attentes d'une expertise d'exploration. En effet, comment juger si le sujet juge le produit comme *Non conforme* pour la même anomalie qu'un autre sujet ? Comment être sûr que toutes les anomalies du produit ont été perçues ?

Comme nous l'avons décrit plus haut, un test R&R suppose, et c'est une première limite à ce test, que cette expertise soit acquise ou que les produits à contrôler ne posent pas de problème de perception. Ce n'est pas pourtant pas toujours le cas et les études menées sur l'application de ce test ne soulèvent pas cette difficulté.

Concernant l'expertise d'évaluation, un test R&R réduit, et c'est une seconde limite de ce test, cette expertise à une capacité du sujet à affecter une valeur binaire (*Conforme* ou *Pas conforme*) à un produit. Avec ce test en effet, il est impossible de comparer des jugements intermédiaires émis par les sujets sur les produits. La seule information dont nous disposons à l'issue de ce test est une information sur l'acceptabilité ou non du produit. Cela induit une grande variabilité dans les résultats. Celle-ci résulte, d'une part, des différences de raisonnement entre les sujets, et d'autre part, du manque d'information à l'origine de la réponse finale émise (par exemple, est ce le même défaut qui a été perçu pour amener les différents sujets à ce résultat ?).

2.1.2.2 MESURE GLOBALE : EXPLORATION ET EVALUATION

Un contrôle doit avoir pour résultat final le jugement sur un produit, c'est-à-dire doit indiquer si l'anomalie ou les anomalies relevées sur le produit sont acceptables ou non. Ce résultat, que l'on peut désigner comme la mesure globale du contrôle, doit être obtenu en suivant la démarche que nous proposons au chapitre 2.

Le test R&R, tel qu'il est décrit par [AIAG, 2002], délivre cette mesure globale mais ne fait pas de distinction dans ce résultat entre ce qui relève de l'exploration et de l'évaluation du produit. Les interprétations à tirer d'un test R&R sont par conséquent très limitées. Il faut donc compléter ce test par des mesures intermédiaires qui pourront expliquer la variabilité des résultats obtenus. Nous proposons donc un nouveau test R^2E^2 (Répétabilité et Reproductibilité & Exploration et Evaluation).

2.2 LE TEST R^2E^2 (REPETABILITE ET REPRODUCTIBILITE & EXPLORATION ET EVALUATION)

Nous avons montré précédemment les limites d'un test R&R. Le nouveau test que nous proposons vise à relier la Répétabilité et la Reproductibilité (R^2) d'un contrôle à l'Exploration et l'Evaluation (E^2) des anomalies. L'objectif de ce test va donc bien au-delà de celui d'un test R&R. Il permet ainsi non seulement d'évaluer la variabilité d'un contrôle, mais il permet également d'explicitier les causes de cette variabilité. Ces causes sont-elles dues à une expertise insuffisante du sujet dans l'exploration des anomalies ? Une expertise insuffisante dans leur évaluation ?

Une première évaluation définissant la capacité des sujets à être à la fois répétable et reproductible entre eux ainsi qu'avec la référence est d'abord proposée. Cette évaluation globale se base sur l'utilisation du coefficient Kappa proposé par Cohen en 1960 et décrit dans [Bonnardel, 1995]. Une évaluation plus détaillée permet ensuite d'identifier ce qui est à l'origine de cette variabilité de la mesure : problème de répétabilité ou de reproductibilité en exploration ou en évaluation.

Le test R^2E^2 permet ainsi de rendre compte, de manière globale, de la capacité du processus de mesure et de l'homogénéité de la mesure (test Kappa) et, de manière plus détaillée :

- de la Répétabilité de l'Exploration, c'est-à-dire la capacité de chaque sujet à percevoir la même anomalie sur un produit lors des deux contrôles

- de la Reproductibilité de l'Exploration, c'est-à-dire la capacité des sujets à percevoir la même anomalie que la référence sur un produit
- de la Répétabilité de l'Evaluation, c'est-à-dire la capacité de chaque sujet à donner la même valeur d'intensité à une anomalie lors des deux mesures
- de la Reproductibilité de l'Evaluation, c'est-à-dire la capacité des sujets à donner la même intensité que la référence à une anomalie
- de l'inertie de la variabilité de la mesure autour de la valeur de référence

Aussi, et c'est l'une des particularités du test que nous proposons, la réponse prise en considération en effectuant ce test n'est pas la décision finale prise sur l'anomalie perçue mais plutôt les réponses données aux différentes étapes du contrôle. L'importance de la perception de l'anomalie (expertise d'exploration) est donc prise en considération (ce n'est, nous l'avons dit plus haut, pas le cas lors de l'application d'un test R&R) et seule l'intensité associée à l'anomalie (expertise d'évaluation) est utilisée. Le test que nous proposons ne juge donc pas de la capacité à accepter ou non l'anomalie, mais juge de la capacité à percevoir l'anomalie et à la quantifier.

2.2.1 LES DONNEES D'UN TEST $R^2 \& E^2$

Comme un test R&R, Le test $R^2 \& E^2$ s'effectue sur la base d'un contrôle d'un échantillon de P produits portant N anomalies (les produits sont ainsi numérotés de 1 à P avant le test).

Un panel d'experts identifie au préalable toutes les anomalies présentes sur les produits et leur attribue une intensité. Le Tableau 23 montre la trame du document à remplir par ces experts lors de leur contrôle de l'échantillon. Ce document inclut en particulier :

- le numéro de produits où est détectée une anomalie (en sachant qu'un produit peut comporter plusieurs anomalies),
- la zone du produit où l'anomalie est détectée (ces zones, qui dépendent du produit considéré, ont été définies au préalable),
- le type de l'anomalie détectée (ces types, qui dépendent du produit considéré, ont été définis au préalable),
- l'intensité de l'anomalie détectée (cette intensité prend une valeur dans un intervalle défini au préalable).

Numéro du produit	Numéro de l'anomalie	REF		
		Zones	Types	Intensités
	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
	6			
	7			
	8			
	9			
	10			
	11			
	12			
	13			
	14			
	15			
	16			
	17			
	18			
	19			
	20			
	21			
	22			
	23			
	24			
	25			
	26			
	27			
	28			
	29			
	30			

Tableau 23 : Trame du document à remplir par le panel expert lors de leur contrôle

Les colonnes *Zones* et *Types* du document (voir Tableau 23) permettent de distinguer parfaitement les anomalies sur un produit et permettent donc de regrouper par anomalie les résultats obtenus.

Dans un second temps, tour à tour, chaque sujet remplit un document dont la trame est identique à celle utilisée par le panel d'experts (Tableau 23). Chaque sujet utilise ce même document pour les deux évaluations qu'il doit réaliser sur chaque produit.

Un tableau de synthèse est ensuite construit pour regrouper les résultats des différents sujets, ainsi que ceux du panel d'experts (Tableau 24). Chaque ligne de ce tableau correspond à l'exploration et à l'évaluation d'une anomalie par les différents sujets et par le panel d'experts (la valeur de référence).

Numéro du produit	Numéro de l'anomalie	REF	Sujet 1				Sujet 2				Sujet 3				Sujet 4				Sujet 5			
			1	2	z1	z2	1	2	z1	z2	1	2	z1	z2	1	2	z1	z2	1	2	z1	z2
	1																					
	2																					
	3																					
	4																					
	5																					
	6																					
	7																					
	8																					
	9																					
	10																					
	11																					
	12																					
	13																					
	14																					
	15																					
	16																					
	17																					
	18																					
	19																					
	20																					
	21																					
	22																					
	23																					
	24																					
	25																					
	26																					
	27																					
	28																					
	29																					
	30																					

Tableau 24 : Synoptique des résultats du test R²&E²

Pour chaque sujet, les colonnes intitulées 1 et 2 permettent de différencier les résultats entre les deux évaluations. Ces colonnes sont remplies de la manière suivante :

- 0 : le produit ne présente pas d'anomalie pour le panel d'experts (valeur de référence) et ne présente pas d'anomalie pour le sujet
- * : le produit ne présente pas d'anomalie pour le panel d'experts mais présente une anomalie pour le sujet. Dans cette situation, nous ne tenons pas compte de l'intensité donnée par le sujet mais uniquement de la présence de l'anomalie relevée par le sujet.
- # : le produit présente une anomalie pour le panel d'experts mais ne présente pas d'anomalie pour le sujet. Dans cette situation, nous ne tenons pas compte de l'intensité donnée par le sujet mais uniquement de l'absence de perception de l'anomalie par le sujet.

Les cellules z1 et z2 donnent les différences entre les intensités données par le sujet et celles données par le panel d'experts (colonne z1 pour la première mesure et colonne z2 pour la seconde mesure dans le Tableau 24).

Le Tableau 25 donne un exemple du tableau de synthèse obtenu. Dans cet exemple, le test $R^2 \& E^2$ a été réalisé à partir d'un échantillon de 24 produits présentant 28 anomalies. Par rapport au tableau de référence (Tableau 24) nous avons inséré deux colonnes supplémentaires, la zone où l'anomalie a été détectée et le type de cette anomalie, et ceci dans le but de mieux différencier les anomalies perçues.

Par exemple, les explorations du panel d'experts et du Sujet 1 ont conduit toutes deux à l'identification de l'anomalie n°1 (voir première ligne). Cette même anomalie a été également perçue par le Sujet 2 lors de son second contrôle. En ce qui concerne les évaluations, le panel d'experts et le Sujet 1 partagent également la même interprétation de l'intensité de cette anomalie (3 pour la valeur référence et 3 également pour la première et la deuxième mesure du Sujet 1).

Numéro du produit	Zones	Types	Numéro de l'anomalie	REF	Sujet 1				Sujet 2				Sujet 3				Sujet 4				Sujet 5			
					1	2	z1	z2	1	2	z1	z2	1	2	z1	z2	1	2	z1	z2	1	2	z1	z2
1	Fond	D	1	3	3	3	0	0	#	3		0	3	3	0	0	#	#			#	#		
2		OK	2	0	0	0	0	0	0	*	0		0	0	0	0	0	*	0		*	*		
3	Carrure	M	3	4	3	3	1	1	4	#	0		4	4	0	0	#	#			#	6		-2
4		OK	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*	*			*	*		
5	Lunette	M	5	3	3	3	0	0	3	3	0	0	3	3	0	0	#	#			#	#		
5	BC	M	6	6	6	6	0	0	6	#	0		6	6	0	0	6	4	0	2	1	#	5	
5	Réhaut	M	7	2	2	3	0	-1	2	#	0		2	2	0	0	2	5	0	-3	#	#		
6	Carrure	M	8	3	3	3	0	0	#	#			#	#			2	5	1	-2	1	1	2	2
7	Réhaut	M	9	5	6	6	-1	-1	#	5		0	6	4	-1	1	5	1	0	4	#	#		
7	Cran	P	10	4	4	4	0	0	4	4	0	0		4		0	5	1	-1	3	2	#	2	
8		OK	11	0	0	0	0	0	0	*	0		0	*	0		0	*	0		*	0		0
9	Fond	M	12	3	3	3	0	0	3	#	0		3	3	0	0	2	5	1	-2	3	#	0	
10	Carrure	M	13	4	4	4	0	0	#	4		0	3	4	1	0	5	1	-1	3	#	#		
10	Réhaut	M	14	3	3	4	0	-1	#	#			3	3	0	0	3	#	0		#	#		
11	Réhaut	M	15	4	4	4	0	0	4	#	0		4	4	0	0	2	6	2	-2	1	#	3	
12	Carrure	M	16	4	4	4	0	0	4	3	0	1	3	#	1		4	#	0		#	#		
13		OK	17	0	0	0	0	0	*	0		0	0	0	0	0	*	*			*	*		
14		OK	18	0	0	0	0	0	*	0		0	0	*	0		*	0		0	*	0		0
15		OK	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*	0		*	*		
16	Carrure	M	20	1	1	1	0	0	1	#	0		1	1	0	0	4	6	-3	-5	#	#		
17		OK	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*	*			0	*	0	
18		OK	22	0	0	*	0		0	*	0		0	0	0	0	*	*			*	*		
19		OK	23	0	0	0	0	0	*	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	*	*		
20	Poussoir	M	24	5	6	5	-1	0	4	#	1		6	6	-1	-1	6	2	-1	3	1	1	4	4
21		OK	25	0	*	0		0	0	0	0	0	*	*			*	0		0	*	*		
22	Poussoir	D	26	3	3	3	0	0	#	#			4	3	-1	0	3	1	0	2	#	2		1
23	Fond	M	27	3	3	3	0	0	3	#	0		3	3	0	0	4	1	-1	2	5	#	-2	
24		OK	28	0	0	0	0	0	*	*			0	0	0	0	0	*	0		*	*		

M et D sont des abréviations de l'anomalie respectivement Marque et Déformation, OK représente un produit sans anomalie
0 : produit ne présentant pas d'anomalie selon la référence, ne présentant pas d'anomalie selon le sujet.

* : produit ne présentant pas d'anomalie par la référence, présentant une anomalie selon le sujet.

: produit présentant une anomalie selon la référence, présentant une anomalie selon le sujet.

z : différence entre l'évaluation du sujet et l'évaluation de la référence.

Tableau 25 : Les données du test

A partir de ces données, les capacités des sujets à explorer les anomalies et à les évaluer peuvent ensuite être calculées.

Pour cela, une première analyse des données (que nous désignons par évaluation globale) est d'abord réalisée. Cette analyse donne une idée globale de la capacité des sujets, sans distinction, à explorer (préparation à la mesure) et à évaluer les anomalies (mesure elle-même).

En fonction du résultat obtenu par cette première analyse, une analyse plus détaillée peut ensuite être réalisée pour renseigner sur ce qui est à l'origine de la variabilité de la mesure : problème d'exploration, problème d'évaluation ou problème d'exploration et d'évaluation à la fois.

Nous détaillons maintenant ces deux analyses.

2.2.2 ANALYSE DES DONNEES D'UN TEST R^2 & E^2

2.2.2.1 PREMIÈRE ANALYSE : EVALUATION GLOBALE

L'évaluation globale permet de rendre compte de la capacité de l'ensemble des sujets à explorer et à évaluer les anomalies. Cette analyse est réalisée en utilisant le test Kappa. Ce test non paramétrique permet de quantifier l'accord (le coefficient Kappa) entre deux ou plusieurs juges, lorsque les jugements exprimés sont qualificatifs.

Les données utilisées par un test Kappa sont généralement présentées dans un tableau de contingence (Tableau 26)

Sujet A						
	Catégorie	1	2	...	r	Total
Sujet B	1	p_{11}	p_{12}	...	p_{1r}	$p_{1.}$
	2	p_{21}	p_{22}	...	p_{2r}	$p_{2.}$

	r	p_{r1}	p_{r2}	...	p_{rr}	$p_{r.}$
	Total	$p_{.1}$	$p_{.2}$...	$p_{.r}$	1

Tableau 26 : Proportion de jugements sur une échelle de r catégories

Dans notre cas, chaque catégorie représente une intensité d'anomalie.

Le coefficient Kappa (K) qui est proposé dans ce test intègre le principe qu'un accord entre deux sujets résulte à la fois d'une composante d'accord « aléatoire » (P_e) et d'une composante d'accord « véritable » (P_o). En définitive, K est un pourcentage de l'accord maximum corrigé de ce qu'il serait sous le simple effet du hasard.

$$K = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad \text{Équation 25}$$

avec

P_o : proportion d'accord observée.

$$P_o = \sum_{i=1}^r p_{ii} \quad \text{Équation 26}$$

p_{ii} : proportion d'accord des deux sujets sur une valeur d'intensité i d'anomalie

r : nombre de valeurs différentes d'intensité d'anomalie ($r \geq 2$)

et

P_e : proportion d'accord aléatoire ou concordance attendue sous l'hypothèse d'indépendance des jugements.

$$P_e = \sum_{i=1}^r p_{i.} p_{.i} \quad \text{Équation 27}$$

Certaines discordances entre les sujets sont parfois plus graves que d'autres. Comme le propose Cohen [Cohen, 1960], il est possible de pondérer certains désaccords en leur attribuant un poids w_{ij} calculé de la manière suivante :

$$w_{ij} = 1 - \frac{|i - j|}{r - 1} \quad \text{Équation 28}$$

avec

i : $i^{\text{ème}}$ colonne de la matrice de poids
 j : $j^{\text{ème}}$ ligne de la matrice de poids

Les proportions d'accord P_o et P_e deviennent :

$$P_o(w) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r w_{ij} p_{ii} \quad \text{Équation 29}$$

et

$$P_e(w) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r w_{ij} p_{i.} p_{.j} \quad \text{Équation 30}$$

Le coefficient Kappa devient :

$$K = \frac{P_o(w) - P_e(w)}{1 - P_e(w)} \quad \text{Équation 31}$$

Ce coefficient Kappa est utilisé pour mesurer l'accord global entre deux sujets. Les résultats de Fleiss [Fleiss et al., 1969] [Fleiss, 1978] [Fleiss et al., 1979] permettent d'étendre ce test à la mesure de l'accord entre plusieurs sujets.

Soit donc m sujets ($m \geq 2$) qui, de manière indépendante, sont amenés à évaluer des anomalies en émettant pour chacune d'elle deux valeurs possibles : + ou -.

La proportion de classement des n anomalies par les m sujets dans la catégorie + est égale à :

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{nm} \quad \text{Équation 32}$$

avec x_i : nombre de jugements de type + pour l'anomalie i
et

$$\bar{m} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n} \quad \text{Équation 33}$$

avec m_i : nombre total de jugements pour l'anomalie i

La moyenne des carrés des écarts entre les jugements (BMS) est approximativement égale à :

$$BMS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{m}_i \bar{P})^2}{m_i} \quad \text{Équation 34}$$

La moyenne des carrés des écarts intra-jugement (WMS) est égale à :

$$WMS = \frac{1}{n(\overline{m}-1)} \sum_{i=1}^n \frac{x_i(m_i - \overline{x_i})}{m_i} \quad \text{Équation 35}$$

Le coefficient de corrélation intra-classe est estimé par :

$$r = \frac{BMS - WMS}{BMS + (m_0 - 1)WMS} \quad \text{Équation 36}$$

avec

$$m_0 = \overline{m} - \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - \overline{m})^2}{n(n-1)\overline{m}} \quad \text{Équation 37}$$

Le coefficient Kappa [K] devient donc :

$$K = \frac{BMS - WMS}{BMS + (\overline{m} - 1)WMS} \quad \text{Équation 38}$$

si le nombre de jugement total n est grand $m_0 \approx \overline{m}$

Les travaux de Landis et Koch [Landis et al., 1977] permettent d'étendre l'application de ce test à r valeurs d'intensité d'anomalie ($r \geq 2$).

Le Kappa global obtenu correspond à la moyenne pondérée des coefficients Kappa individuels K_i , i.e. des coefficients Kappa relatifs à chaque couple de valeurs d'intensité d'anomalie.

Le coefficient Kappa global proposé est estimé par :

$$\overline{K} = \frac{\sum_{i=1}^r \overline{p_i q_i} K_i}{\sum_{i=1}^r \overline{p_i q_i}} \quad \text{Équation 39}$$

Avec $q=1-p$

Le Tableau 27 donne un exemple d'analyse globale réalisée à partir des données du Tableau 26.

	Sujet 1		Sujet 2		Sujet 3		Sujet 4		Sujet 5		REF
Poids Anomalies	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10*
1	3	3		3	3	3					3
2	0	0	0	*	0	0	0	*	*	*	0
3	3	3	4		4	4				6	4
4	0	0	0	0	0	0	*	*	*	*	0
5	3	3	3	3	3	3					3
6	6	6	6		6	6	6	4	1		6
7	2	3	2		2	2	2	5			2
8	3	3					2	5	1	1	3
9	6	6		5	6	4	5	1			5
10	4	4	4	4		4	5	1	2		4
11	0	0	0	*	0	*	0	*	*	0	0
12	3	3	3		3	3	2	5	3		3
13	4	4		4	3	4	5	1			4
14	3	4			3	3	3				3
15	4	4	4		4	4	2	6	1		4
16	4	4	4	3	3		4				4
17	0	0	*	0	0	0	*	*	*	*	0
18	0	0	*	0	0	*	*	0	*	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	*	*	*	0
20	1	1	1		1	1	4	6			1
21	0	0	0	0	0	0	*	*	0	*	0
22	0	*	0	*	0	0	*	*	*	*	0
23	0	0	*	0	0	0	0	0	*	*	0
24	6	5	4		6	6	6	2	1	1	5
25	*	0	0	0	*	*	*	0	*	*	0
26	3	3			4	3	3	1		2	3
27	3	3	3		3	3	4	1	5		3
28	0	0	*	*	0	0	0	*	*	*	0

* poids égal au nombre total d'évaluations par anomalie (2 évaluations réalisées par les 5 sujets, soit une valeur égale à 10))

Tableau 27 : Exemple d'analyse des données d'un test R²&E² : analyse globale

L'évaluation globale donne un coefficient Kappa K égal à 0,459. L'accord entre sujets ainsi qu'entre sujets et la référence peut être considéré, si l'on se réfère au Tableau 1, comme modéré mais, dans notre cas, doit être considéré comme très insuffisant compte tenu des exigences de qualité de l'entreprise. Ce mauvais résultat s'explique t-il par un problème de répétabilité ? de reproductibilité ? en exploration ? en évaluation ? Une étude plus détaillée aide à y répondre.

2.2.2.2 ANALYSE DÉTAILLÉE

Lorsque l'évaluation globale révèle une variabilité du contrôle trop grande, une analyse plus détaillée peut être réalisée. Cette analyse permet de rendre compte du niveau d'expertise d'exploration et du niveau d'expertise d'évaluation de chaque sujet.

2.2.2.2.1 Expertise d'exploration

Nous entendons par expertise d'exploration la capacité d'un sujet à percevoir une anomalie. La reproductibilité d'exploration d'un sujet i est évaluée à l'aide du ratio η_i qui exprime la proportion d'anomalies perçues par le sujet par rapport à la référence.

$$\eta_i = \frac{n_i}{N} \quad \text{Équation 40}$$

avec

n_i : nombre total d'anomalies perçues par le sujet i pour l'ensemble des produits de l'échantillon du test

N : nombre total d'anomalies perçues par le panel d'experts pour l'ensemble des produits de l'échantillon du test

La répétabilité d'exploration d'un sujet i est évaluée à l'aide du ratio ρ_i qui exprime la proportion d'anomalies perçues par le sujet i lors des deux explorations par rapport au nombre d'anomalies totales vues par le sujet i .

$$\rho_i = \frac{m_i}{N_i} \quad \text{Équation 41}$$

avec

m_i : nombre total d'anomalies perçues par le sujet i dans deux contrôles successifs

N_i : nombre total d'anomalies perçues par le sujet i pour l'ensemble des produits de l'échantillon du test

* Valeur de la limite d'acceptation pour la reproductibilité de l'exploration

Nous avons fixé à 80% le niveau minimal à atteindre pour valider la mesure ($\eta_i > 80\%$). Cette limite de 20% est fixée par transposition avec les limites d'acceptation dans le cas mesurable. Deux évaluations sont couramment utilisées pour évaluer cette capacité du processus de contrôle : le Cpc ou le Gage R&R de la norme [AIA, 2002].

Le Cpc se calcule par la relation :

$$Cpc = \frac{USL - LSL}{6\sigma_{\text{measurement process}}} \quad \text{Équation 42}$$

Un processus de contrôle est jugé acceptable si son Cpc est supérieur à 4.

Le Gage R&R est calculé par la relation suivante :

$$\%GR \& R = 100 \frac{GR \& R}{Pr ocessVariation} \quad \text{Équation 43}$$

avec $Pr ocessVariation = 6\sigma_{\text{SigmaRange}}$

$GR \& R = 5.15(\bar{R}) / d_2^*$, \bar{R} est l'étendue moyenne et d_2^* est une valeur tabulée

Un processus de contrôle est jugé acceptable si son %GR&R est inférieur à 20%
 Nous pouvons donc écrire que :

$$GRR\% = \frac{100}{C_{pc}} \quad \text{Équation 44}$$

A noter que le Gage R&R est soit l'intervalle contenant k sigma avec k = 5.15 pour 99% des observations (préconisation de la norme QS9000), soit l'intervalle contenant k sigma avec k = 6 pour 99.73% des observations ce qui explique la sensible différence entre les relations de C_{pc} et %GR&R.

% GR&R = 20% signifie que l'incertitude de mesure couvre 20% de la plage de variabilité. Par analogie, nous avons choisi de fixer le niveau d'acceptation de la reproductibilité de l'exploration à 20%.

✱ *Valeur de la limite d'acceptation pour la répétabilité de l'exploration*
 Pour les mêmes raisons que ci-dessous, nous fixons comme limite : $\rho_i > 80\%$.

Le Tableau 28 montre les résultats obtenus pour l'expertise d'exploration avec les données du Tableau 6 fourni précédemment.

	Sujet 1	Sujet 2	Sujet 3	Sujet 4	Sujet 5
ni	54	31	48	34	14
N	56	56	56	56	56
mi	26	7	22	13	2
Ni	28	24	26	21	12
$\eta_i = ni/N$	0.964	0.554	0.857	0.607	0.250
$\rho_i = mi/Ni$	0.929	0.292	0.846	0.619	0.167

Tableau 28 : Exemple d'analyse des données d'un test $R^2 \& E^2$: analyse détaillée de l'exploration

Le Sujet 1 est donc jugé comme apte en reproductibilité et en répétabilité en *exploration* ($\eta_i = 0,964 > 0,75$, $\rho_i = 0,929 > 0,75$). C'est le cas aussi du sujet 3 ($\eta_i = 0,857 > 0,75$, $\rho_i = 0,846 > 0,75$). Les Sujets 2, 4 et 5 sont en revanche considérés comme inaptes en exploration, tant en reproductibilité qu'en répétabilité ($\eta_i < 0,75$, $\rho_i < 0,75$).

Le Tableau 29 montre la synthèse des résultats obtenus sur le niveau d'expertise d'exploration de l'ensemble des sujets.

Exploration expertise	Sujet1	Sujet 2	Sujet 3	Sujet 4	Sujet 5
Reproductibilité η_i	APTE	INAPTE	APTE	INAPTE	INAPTE
Répétabilité ρ_i	APTE	INAPTE	APTE	INAPTE	INAPTE

Tableau 29 : Résultats de chaque sujet pour l'exploration

Les Sujets 1 et 3 sont les seuls à être considérés comme capables en tant qu'instrument de mesure à percevoir l'anomalie, i.e. ils possèdent une expertise suffisante en exploration, tant au niveau de la répétabilité que de la reproductibilité vis-à-vis de la référence. Les autres sujets sont donc inaptes et devront donc suivre une formation afin d'améliorer leur niveau d'expertise d'exploration. L'effort à fournir pour avoir une performance acceptable peut être ainsi quantifié par la différence entre η_i et ρ_i de chaque sujet par rapport à leurs valeurs limites.

2.2.2.2 Expertise d'évaluation

Nous entendons par expertise d'évaluation la capacité d'un sujet à donner une intensité correcte à une anomalie détectée.

La Figure 48 montre ce qui pourrait être considéré comme un bon niveau d'expertise d'évaluation (\bar{z} proche de 0, i.e. l'intensité donnée par le sujet sur l'anomalie se rapproche de celle donnée par la référence et σ petit, i.e. la variabilité des mesures est très faible).

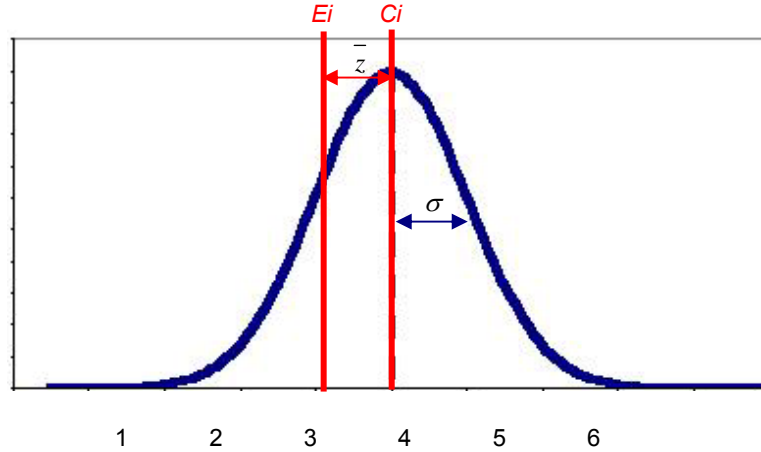


Figure 48 : Variables utilisées dans l'expertise d'évaluation

La reproductibilité de l'évaluation entre les sujets et la référence est évaluée grâce au calcul de la moyenne \bar{z} permettant d'estimer le biais de l'évaluation :

$$\bar{z} = \frac{\sum z_j}{n} \quad \text{Équation 45}$$

avec

$$z_j = C_j - E_j \quad \text{Équation 46}$$

C_j : valeur de l'intensité

E_j : valeur donnée par la référence

La répétabilité de l'évaluation est évaluée par le calcul de l'écart type σ permettant d'estimer la variabilité autour du biais:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (z_j - \bar{z})^2}{n-1}} \quad \text{Équation 47}$$

avec n , le nombre des anomalies évaluées par chaque sujet

Les valeurs obtenues pour la répétabilité et la reproductibilité permettent également de construire un indicateur global de l'expertise d'évaluation basé sur le calcul de l'inertie I . Cette inertie est en réalité l'un des termes composant la fonction de perte de Taguchi, notée L . Pour chaque anomalie, le panel d'experts a donné une intensité qui représente ainsi la référence. Cette référence est par conséquent la valeur cible que chaque sujet espère donner ou, tout du moins, la valeur dont il souhaite s'approcher. Dans le cas idéal, le sujet et la référence sont en accord. A l'inverse, lorsque l'intensité donnée par le sujet s'éloigne de la référence, la variabilité de la mesure sera de plus en plus importante. Taguchi a démontré

que la perte financière associée à un écart par rapport à la cible était proportionnelle au carré de l'écart par rapport à la cible (décentrage).

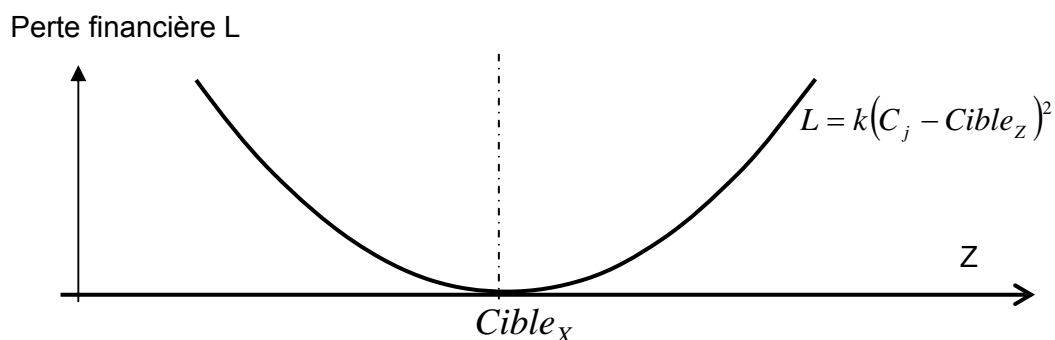


Figure 49 : Fonction perte de Taguchi

Dans le cas d'un lot, la perte associée peut être démontrée comme suit :

$$\bar{L} = \frac{\sum k(C_j - Cible)^2}{n} = \frac{k \sum (C_j - \bar{C} + \bar{C} - Cible)^2}{n} \quad \text{Équation 48}$$

$$\bar{L} = \frac{k \sum (C_j - \bar{C})^2 + (\bar{C} - Cible)^2 + 2(C_j - \bar{C})(\bar{C} - Cible)}{n} \quad \text{Équation 49}$$

Le terme du double produit étant égale à zéro, on retrouve comme expression de la perte :

$$\bar{L} = k(\sigma_c^2 + (\bar{C} - Cible_c)^2) = k(\sigma_c^2 + \delta_c^2) \quad \text{Équation 50}$$

avec

σ_c^2 : écart type des intensités données par les sujets

δ_c^2 : décalage des intensités données par les sujets par rapport à la cible

Fondé sur la fonction perte, Pillet [Pillet, 2004] a proposé d'utiliser l'inertie $I_c = \sqrt{\sigma_c^2 + \delta_c^2}$ comme une spécification des produits. Dans la perte moyenne, le terme variable $I_c^2 = \sigma_c^2 + \delta_c^2$ (moyenne des écarts quadratiques) peut être rapproché de l'"inertie" d'une masse autour de la cible.

Dans le cas ou on dispose des valeurs individuelles d'un échantillon, l'inertie de cet échantillon est calculée par la relation :

$$I = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (C_j - Cible)^2}{n}} = \sqrt{\sigma^2 + \delta^2} \quad \text{Équation 51}$$

Qui peut être estimée par la relation :

$$I = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (C_j - E_j)^2}{n-1}} \quad \text{Équation 52}$$

On peut donc conclure que l'Inertie I peut s'écrire de la manière suivante :

$$I = \sqrt{\frac{\sum z_j^2}{n-1}} \quad \text{Équation 53}$$

✱ *Valeur de la limite d'acceptation pour la reproductibilité de l'évaluation*

La reproductibilité est acceptable si le biais n'est pas significatif. Avec un niveau de confiance donné, nous calculons la variable de Student $[t]$ à partir des résultats obtenus lors du test:

$$t = \frac{\bar{z}}{\sigma/\sqrt{k}} \quad \text{Équation 54}$$

Cette valeur va alors être comparée à la variable de Student représentative du niveau de confiance voulu ($t_{1-\alpha/2, n-1}$) déterminée dans la table de Student. Cette variable est la valeur

limite de t pour $n-1$ degrés de liberté et un risque $\alpha/2$.

En utilisant un test d'hypothèse bilatéral t , il est possible de dire si le biais est significatif ou non. Si $-t_{1-\alpha/2, n-1} \leq t \leq t_{1-\alpha/2, n-1}$ il n'y a pas de biais dans la mesure.

✱ *Valeur de la limite d'acceptation pour la répétabilité de l'évaluation*

Le système de notation de l'anomalie mis en place et utilisé permet de donner une intensité de 1 à 6. Dans ce cas, le raisonnement a été fondé sur l'hypothèse que l'erreur d'incertitude de mesure était de ± 1 .

Ces deux remarques permettent de justifier que la variabilité de l'évaluation considérée comme acceptable n'excède pas une distance de ± 1.5 pour une dispersion de 4 écarts types (soit 95,44% de la population dans le cas d'une distribution normale).

Le seuil d'acceptation de validation de l'expertise est donc fixé à :

$$\sigma_{\text{repeatability}} < 0.75$$

✱ *Valeur de la limite d'acceptation globale de l'expertise d'évaluation*

L'inertie combine les deux écarts de biais et de variabilité. En cas de biais nul, l'inertie est égale à l'écart type. Le principe de l'inertie consiste à évaluer globalement les deux éléments de telle sorte que tous les gains sur la variabilité puissent permettre un écart en biais. Le seuil d'acceptation de l'évaluation de l'inertie est donc égal au seuil sur l'écart type. Il est ainsi fixé à $I = 0,75$.

Le Tableau 30 montre les résultats obtenus pour l'expertise d'évaluation avec les données du Tableau 25 donné précédemment.

	Limite d'acceptation	Sujet 1	Sujet 2	Sujet 3	Sujet 4	Sujet 5
Reproductibilité [Bais]		-0.056	0.065	-0.021	0.059	1.357
t_{exp} [Variable de Student]	± 2.05 (95% ;27 ddl)	-1.137	1.438	-0.375	0.180	2.340
Répétabilité [Sigma]	0.75	0.359	0.250	0.385	1.906	2.170
Evaluation [Inertie]	0.75	0.363	0.258	0.386	1.907	2.587

Tableau 30 : Exemple d'analyse des données d'un test $R^2 \& E^2$: analyse détaillée de l'évaluation

Concernant l'expertise d'évaluation, les Sujets 1, 2 et 3 sont donc jugés comme aptes en reproductibilité, en répétabilité et en évaluation globale. Ce n'est en revanche pas le cas du Sujet 4.

Le Tableau 31 montre la synthèse des résultats obtenus sur le niveau d'expertise de l'ensemble des sujets.

Evaluation expertise	Sujet1	Sujet 2	Sujet 3	Sujet 4	Sujet 5
Reproductibilité (apte si $t > 2.05$)	APTE	APTE	APTE	APTE	INAPTE
Répétabilité (apte si ≤ 0.75)	APTE	APTE	APTE	INAPTE	INAPTE
Inertie évaluation (apte si ≤ 0.75)	APTE	APTE	APTE	INAPTE	INAPTE

Tableau 31 : Résultats de chaque sujet pour l'évaluation

Les Sujets 1, 2, 3 et 4 sont considérés comme reproductifs à l'évaluation des anomalies en comparaison avec la référence. Les Sujets 1, 2 et 3 sont répétables à l'évaluation des anomalies. L'inertie nous donne donc une note globale de l'expertise d'évaluation en indiquant que seuls les Sujets 4 et 5 sont inaptes à évaluer correctement des produits.

2.2.2.3 RECAPITULATIF DES CALCULS DU TEST $R^2 \& E^2$

Le Tableau 32 résume les calculs que nous proposons pour le test $R^2 \& E^2$.

Evaluation globale

En fonction des résultats obtenus, le tableau suivant peut alors être complété :

Numéro de l'anomalie	Nombre total de jugement pour chaque anomalie	Intensités			
		1	2	...	r
1	m_1	x_{11}	x_{12}		
2	m_2	x_{21}			
...					
i	m_i	x_{i1}			x_{ir}
...					
n	m_n	x_{n1}			x_{nr}

A partir de ce résultat, les calculs nécessaires à la détermination du coefficient Kappa global vont alors pouvoir être effectués en complétant le tableau suivant :
Chaque terme du tableau sera alors calculer pour chaque intensité.

	Intensités			
	1	2	...	r
$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{nm}$ avec $n =$ et $\bar{m} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n} =$				
$BMS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - m_i \bar{P})^2}{m_i}$				
$WMS = \frac{1}{n(\bar{m} - 1)} \sum_{i=1}^n \frac{x_i (m_i - x_i)}{m_i}$				
$r = \frac{BMS - WMS}{BMS + (m_0 - 1)WMS}$ avec $m_0 = \bar{m} - \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2}{n(n-1)\bar{m}} =$				
$K = \frac{BMS - WMS}{BMS + (\bar{m} - 1)WMS}$				

Nous obtenons alors
$$\bar{K} = \frac{\sum_{i=1}^r p_i \bar{q}_i K_i}{\sum_{i=1}^r p_i \bar{q}_i} =$$

Evaluation détaillée

Reproductibilité

Exploration

	Sujet i				
Anomalies	r_1	r_2	n_{ij}	m_{ij}	N_{ij}
1					
...					
j					
...					
n					

Avec

r_1 : première répétition

r_2 : seconde répétition

n_{ij} : Le nombre de fois que l'anomalie j a été perçue lors des répétitions

$N = n \times \text{nombre de répétitions}$

$$n_i = \sum_{j=1}^n n_{ij} =$$

Nous obtenons alors $\eta_i = \frac{n_i}{N} =$

Evaluation

	E_j	Sujet i		Sujet i	
Anomalies		C_i	z_j	z_{j1}	z_{j2}
1					
...					
j					
...					
n					

Avec

r_1 : première répétition

r_2 : seconde répétition

C_j : valeur de l'intensité donnée par le sujet i pour l'anomalie j

E_j : valeur donnée par la référence pour l'anomalie j

$z_j = C_j - E_j$ (à remplir dans le tableau)

Nous obtenons alors $\bar{z} = \frac{\sum z_j}{k} =$

Répétabilité

Exploration

	Sujet <i>i</i>				
Anomalies	r_1	r_2	n_{ij}	m_{ij}	N_{ij}
1					
...					
j					
...					
n					

Avec

r_1 : première répétition

r_2 : seconde répétition

m_{ij} : Le nombre de fois que l'anomalie *j* a été
lors de toutes les répétitions

N_{ij} : Le nombre d'anomalies perçue au moins
une fois lors du test

$$m_i = \sum_{j=1}^n m_{ij} =$$

$$N_i = \sum_{j=1}^n N_{ij} =$$

Nous obtenons alors $\rho_i = \frac{m_i}{N_i} =$

Evaluation

	E_j	Sujet <i>i</i>		Sujet <i>i</i>	
Anomalies		C_i	z_i	z_{j1}	z_{j2}
1					
...					
j					
...					
n					

Avec

r_1 : première répétition

r_2 : seconde répétition

C_j : valeur de l'intensité donnée par le sujet *i*
pour l'anomalie *j*

E_j : valeur donnée par la référence pour
l'anomalie *j*

n : Le nombre de anomalies évaluées par
chaque sujet

Nous obtenons alors

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (z_i - \bar{z})^2}{n-1}} \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum (z_j - \bar{z})^2}{n-1}} =$$

Inertie

Suite aux termes que nous avons calculés précédemment, nous pouvons en déduire :

$$I = \sqrt{\frac{\sum z_j^2}{n-1}} =$$

Tableau 32 : Récapitulatif des calculs effectués pour un test R²&E²

3 UNE ORGANISATION METROLOGIQUE

Comme nous l'avons dit, la maîtrise des expertises d'exploration et d'évaluation n'est pas simple à obtenir. Elle est également difficile à stabiliser dans le temps. La principale crainte dans l'exploration et dans l'évaluation d'une anomalie concerne en effet la variabilité pouvant survenir, soit entre les sujets, soit dans le temps pour un même sujet.

Il est alors nécessaire d'assurer la pérennité de la mesure et celle de l'instrument de mesure. En métrologie dimensionnelle, cette pérennité est garantie par la mise en place d'une organisation métrologie dimensionnelle. Cette organisation met en relation les processus de formation, d'étalonnage et de suivi pour garantir un instrument de mesure dit capable. C'est donc sur ce qui se fait en métrologie dimensionnelle que nous avons basé notre proposition d'organisation métrologique sensorielle.

3.1 UNE ORGANISATION POUR MAITRISER LA VARIABILITE

Le test R²&E², que nous avons proposé précédemment, montre son utilité pour quantifier, et c'était le premier objectif que nous nous étions fixé, la variabilité créée par l'instrument de mesure.

Cependant, une fois mesurée, cette variabilité doit être, soit maintenue si elle est dans les tolérances, soit diminuée si elle est trop importante pour obtenir un contrôle fiable (Figure 50). La qualité d'un contrôle qualité dépend en effet également de la manière dont cette variabilité peut être maîtrisée à un instant donné et dans le temps. Cela suppose que soit mise en place une organisation métrologique (Figure 50) permettant de mieux fiabiliser les mesures effectuées et contribuant ainsi à mieux maîtriser la variabilité de ces mesures.. De fait, cela implique une démarche rigoureuse et permanente en direction de l'ensemble des instruments de mesure.

L'organisation à mettre en place doit donc d'abord inclure des actions visant à quantifier la variabilité pour déterminer si celle-ci est acceptable ou trop importante. Le test Kappa peut aider à cela.

Dans le cas d'une variabilité acceptable, des actions doivent être mises en oeuvre pour la maintenir à son niveau et/ou de détecter toute dérive avant qu'elle ne s'amplifie. L'organisation se chargera alors de valider, pas à pas, les étapes de mesure où la variabilité pourrait apparaître.

Dans le cas d'une variabilité importante, des actions doivent être mises en oeuvre pour la réduire. L'organisation devra donc inclure des moyens permettant d'identifier les causes de cette variabilité. Le test R²&E² occupe donc une place privilégiée dans cette organisation puisqu'il contribue à déterminer si cette variabilité trouve plutôt son origine en exploration ou en évaluation, en répétabilité ou en reproductibilité.

Pour réduire cette variabilité, l'organisation sera bien évidemment également centrée sur les instruments de mesure au travers de leur formation, leur étalonnage et leur suivi.

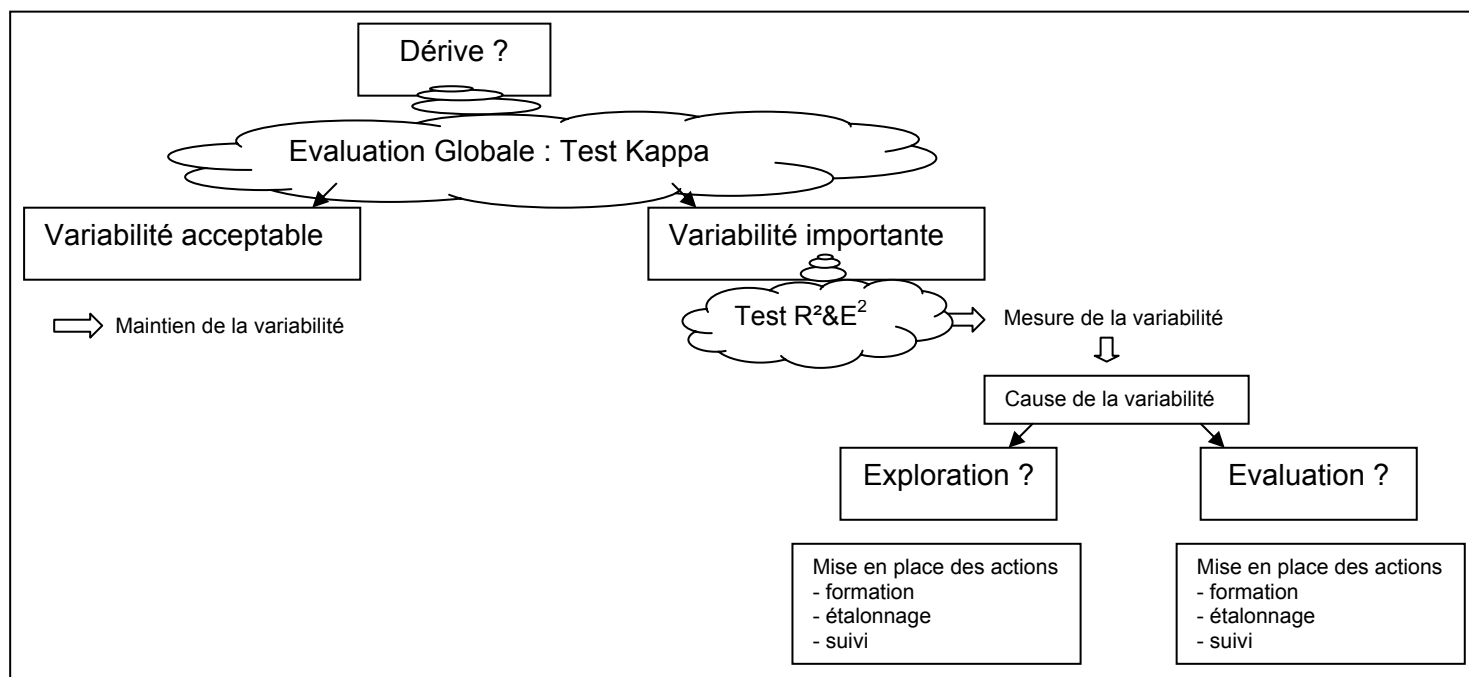


Figure 50 : Une organisation pour maîtriser la variabilité

3.2 UN REFERENTIEL POUR PERCEVOIR LA VARIABILITE

Comment réduire la variabilité si nous ne la percevons pas ? Percevoir cette variabilité, et donc une dérive quelconque, signifie pouvoir se positionner, comme dans tout système métrologique, par rapport à un référentiel.

C'est pourquoi, nous avons cherché durant l'élaboration de la démarche développée au chapitre 2 à construire ce référentiel le plus tôt possible. Ce référentiel regroupe les résultats de l'évaluation réalisée par les experts pour chaque anomalie, ces résultats incluant le descriptif de chaque anomalie, son intensité et sa localisation sur le produit. Ce référentiel fournit donc l'ensemble des « références », i.e. la valeur considérée comme juste dans le test $R^2&E^2$.

Une comparaison entre ce référentiel et les évaluations réalisées par les sujets peut ensuite être réalisée. Les éventuelles dérives peuvent ainsi être constatées et la variabilité peut être quantifiée globalement, mais aussi pour chaque instrument de mesure.

3.3 LA NOTION DE METROLOGIE

Le CADAS [Cadas, 1996] qualifie la métrologie dimensionnelle comme "*la science de la mesure associée à la définition de son incertitude*". Il faut donc entendre par métrologie tout ce qui concerne les unités de mesure et leurs étalons, les instruments de mesure et leur champ d'application.

3.3.1 QUELQUES DEFINITIONS

Parmi les termes incontournables en termes de métrologie dimensionnelle, nous trouvons [ISO Guide99, 1993] :

✱ *Le mesurande* : il s'agit de la grandeur physique soumis à l'opération de mesurage.

- ✖ *Le mesurage* : communément appelé *mesure*, dans la norme française le mesurage désigne le fait d'effectuer la mesure.
- ✖ *Le calibrage* : il peut être défini comme le positionnement de certains repères d'un instrument de mesure en fonction des valeurs correspondantes du mesurande.
- ✖ *La mesure* : il s'agit de la valeur donnée au mesurande résultant du mesurage.
- ✖ *L'étalonnage* : il désigne l'opération établissant une relation entre les valeurs indiquées par un appareil et les valeurs matérialisées par des étalons.

3.3.2 LA METROLOGIE DIMENSIONNELLE

La définition du CADAS de la métrologie dimensionnelle souligne l'importance de la mesure et de son incertitude.

3.3.2.1 PRISE EN COMPTE DE LA MESURE

La mesure est le premier outil nécessaire à la prise de décision.

En métrologie dimensionnelle, deux situations peuvent être retenues dans l'utilisation de la mesure :

- validation de la conformité d'un produit
- vérification de la capacité d'un processus de production

Ces deux situations sont bien évidemment dépendantes l'une de l'autre. En effet, si le processus de production est jugé capable, le produit aura toutes les chances d'être conforme. Ces deux situations sont donc reliées par une même donnée : la mesure.

3.3.2.2 PRISE EN COMPTE DE L'INCERTITUDE DE MESURE

L'une des principales notions en métrologie est la prise en compte de l'incertitude de mesure. La métrologie définit donc deux types d'erreurs (Figure 51) :

- les erreurs de type aléatoire : ces erreurs sont dues à la dispersion du processus.
- Les erreurs de type systématique : il s'agit de quantifier le décentrage entre la valeur vraie et la valeur moyenne obtenue grâce aux mesures effectuées.

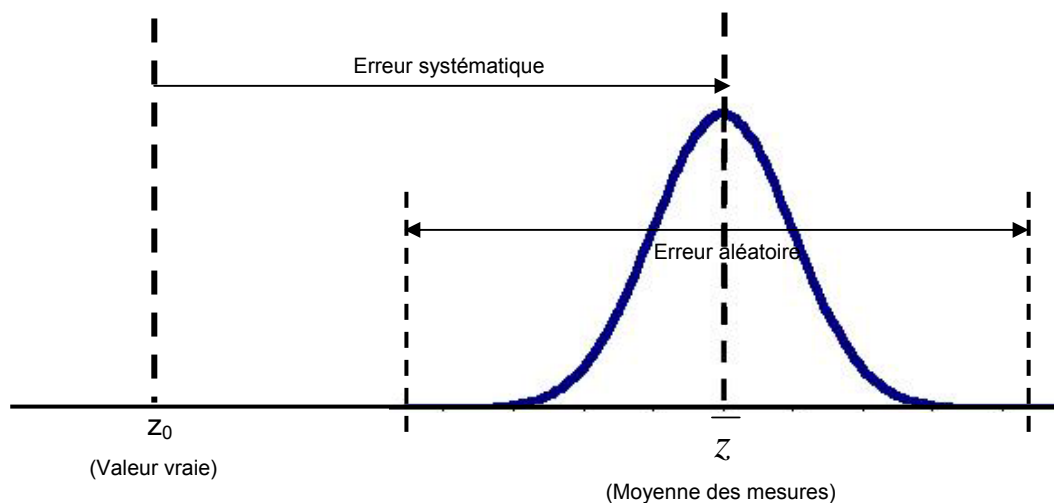


Figure 51 : Incertitude de mesure, les types d'erreurs

3.4 LES BONNES PRATIQUES EN METROLOGIE DIMENSIONNELLE

3.4.1 LE SYSTEME DE COTATION

Comme nous avons pu le voir précédemment au travers des quelques définitions du paragraphe 3.3.1, la mesure effectuée doit être comparée à une référence. Or cette référence dans le cas d'une métrologie dimensionnelle fait appel à certaines règles. Ces dernières font partie d'un système de cotation définies dans la norme NF E 04-521. Toutes les informations dimensionnelles nécessaires pour définir clairement et complètement une pièce font alors partie de cette norme. Ce système de cotation renseigne sur ce qu'est la référence ainsi que ce qu'est l'intervalle de tolérance acceptable. Il liste donc un ensemble de cotes permettant de dimensionner, de positionner et de localiser les différents mesurands de la pièce.

La Figure 52 montre un exemple de cotation

- sur des critères pour une zone : distance d'un point à un autre (1), diamètre de l'arbre (2), ...
- sur des critères entre zones : coaxialité de deux arbres (3), ...

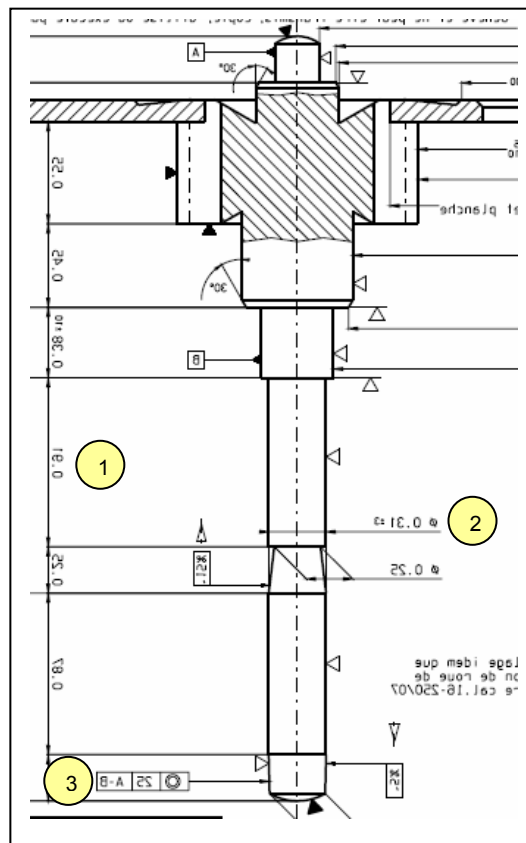


Figure 52 : Un exemple de cotation

3.4.2 LES INSTRUMENTS DE MESURE

Certaines exigences au niveau des instruments de mesure doivent être définies pour limiter toute possibilité de dérive. Elles sont destinées à établir l'erreur maximale tolérée des instruments de mesure ainsi que les conditions dans lesquelles elles doivent être respectées. Elles spécifient aussi certaines caractéristiques telles que le maintien des

qualités métrologiques des instruments lors de leur utilisation, la simplicité et la non ambiguïté des résultats des mesurages.

3.4.3 L'ORGANISATION METROLOGIQUE

La métrologie dimensionnelle [Bourdet et al., 1998] [Guerra et al., 2007] est aujourd'hui bien implantée dans le monde industriel dès lors qu'il s'agit d'effectuer une mesure de contrôle de la production ou de la qualité.

Pour assurer la qualité de la mesure, une organisation métrologique est généralement mise en place. Cette organisation est basée sur le principe que l'instrument de mesure doit garantir la valeur qu'il a lui-même déterminée. La métrologie dimensionnelle parle dans ce cas d'étalonnage de l'instrument de mesure. Cet étalonnage est réalisé à l'aide d'étalons (Figure 53).

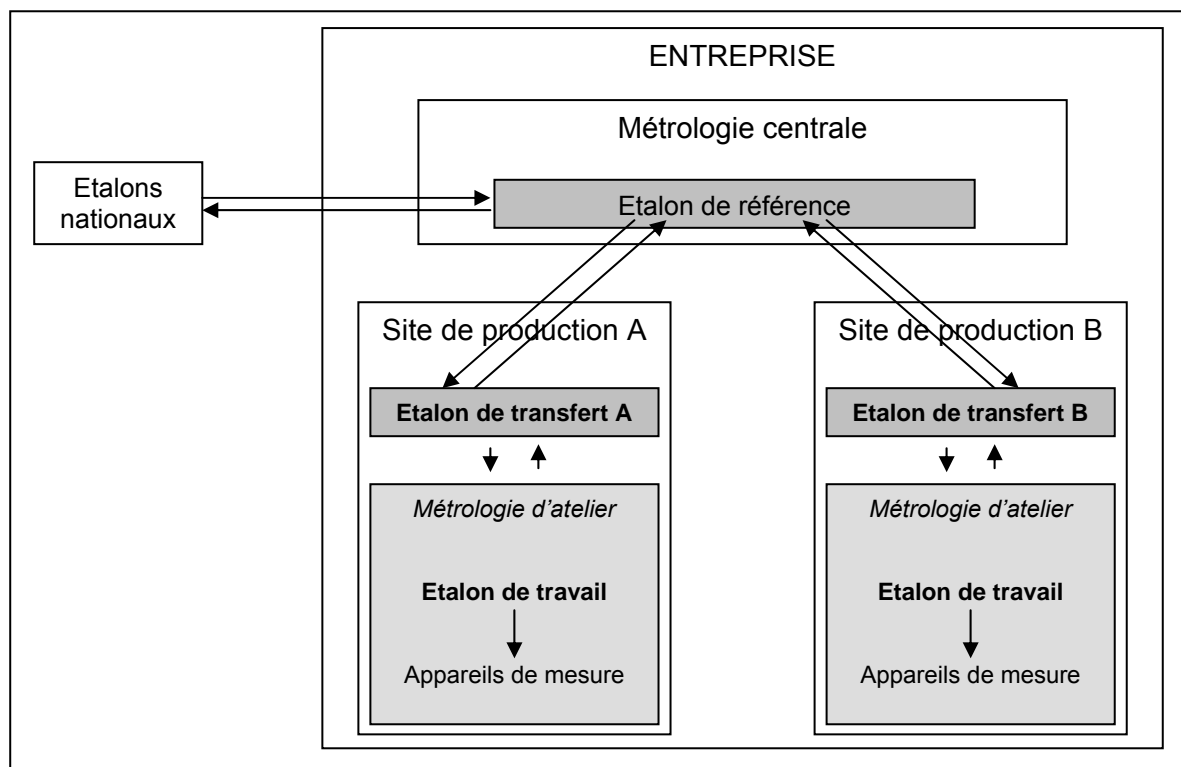


Figure 53 : Métrologie dimensionnelle : étalonnage [Duret et al., 2005]

L'organisation mise en place a en charge d'assurer la validité des étalons à chaque niveau. Les étalons nationaux sont, à intervalles réguliers, comparés aux étalons internationaux dont l'exactitude est supérieure. Déposés en général à l'Institut national de métrologie, au Bureau national des étalons ou au Bureau national des poids et mesures, ces étalons nationaux servent de référence pour les valeurs attribuées à d'autres étalons de mesure.

La Figure 53 montre les trois niveaux d'étalonnage au sein d'une entreprise, chacun de ces niveaux possédant son propre étalon avec une qualification spécifique :

- l'étalon de travail est utilisé couramment pour étalonner les appareils de mesure.
- l'étalon de transfert est utilisé pour faire le lien entre l'étalon de travail et l'étalon de référence. C'est la référence du site de production.
- l'étalon de référence est l'étalon de la haute qualité en un lieu donné.

Chacun de ces étalons est vérifié, ou étalonné, par l'étalon du niveau supérieur.

Cette hiérarchie des étalons permet d'assurer la traçabilité des mesures réalisées. Dans le vocabulaire international de l'étalonnage la traçabilité d'une mesure peut se définir comme l'assurance que cette mesure puisse être reliée à un étalon national ou international (*"propriété d'un résultat de mesure ou la valeur d'un étalon de mesure consistant à pouvoir le relier à des références déclarées, généralement des étalons nationaux ou internationaux, par une chaîne ininterrompue de comparaisons présentant toutes des incertitudes déclarées"*)

3.4.4 CAPABILITE DU MOYEN DE MESURE

La notion de capacité d'un moyen de mesure fait également partie intégrante de la métrologie dimensionnelle. Nous avons décrit son principe au paragraphe 2. Elle intervient bien évidemment comme élément de contrôle une fois mis en place les points explicités ci-dessus : système de cotation, instrument de mesure et organisation métrologique.

3.5 L'ANALOGIE METROLOGIE DIMENSIONNELLE – METROLOGIE SENSORIELLE

Dans le chapitre 2, nous avons détaillé la méthode d'évaluation nous permettant de faire une distinction entre la préparation à la mesure (i.e. l'exploration), la mesure en elle-même (i.e. l'évaluation) et la réponse à la mesure (i.e. la décision). Rappelons en effet que l'anomalie détectée est mesurée grâce à une grille d'intensité que nous avons construite. Le produit est ensuite, en fonction de la zone où cette anomalie est détectée, accepté ou refusé.

En faisant une analogie avec la métrologie dimensionnelle, nous voyons que les termes spécifiques définis au paragraphe 3.3.1 sont tout à fait transposables à notre méthode, et donc, tout à fait transposables à une métrologie sensorielle.

La méthode que nous avons proposée ne suffit cependant pas à éliminer toute variabilité dans les contrôles visuels des produits. Encore faut-il en effet comme dans le cas d'un contrôle dimensionnel des produits, que l'instrument de mesure utilisé ne dérive pas dans le temps. Lors d'un contrôle dimensionnel en effet, la principale contrainte est de parvenir à conserver un étalonnage similaire au cours du temps (cela correspond d'ailleurs à une exigence importante des normes qualité ISO 9000 ou TS16949). Le problème se pose quasiment de la même manière pour un contrôle visuel des produits. En effet, il s'agit là encore de réduire les erreurs de mesure liées à la variabilité créée par l'instrument de mesure, c'est-à-dire, dans notre cas, créée par le sujet effectuant la mesure. A l'image de ce qui se fait dans le domaine du contrôle dimensionnel, notre objectif est donc de proposer une organisation d'une chaîne d'étalonnage d'évaluation visuelle. Cette organisation correspond à une transposition des bonnes pratiques d'une métrologie dimensionnelle au cas d'une métrologie sensorielle caractérisée par une subjectivité plus grande dans l'évaluation effectuée lors du contrôle. La Figure 54 résume les principales analogies que nous avons relevées entre la métrologie dimensionnelle et la métrologie sensorielle. [Guerra et al., 2007]

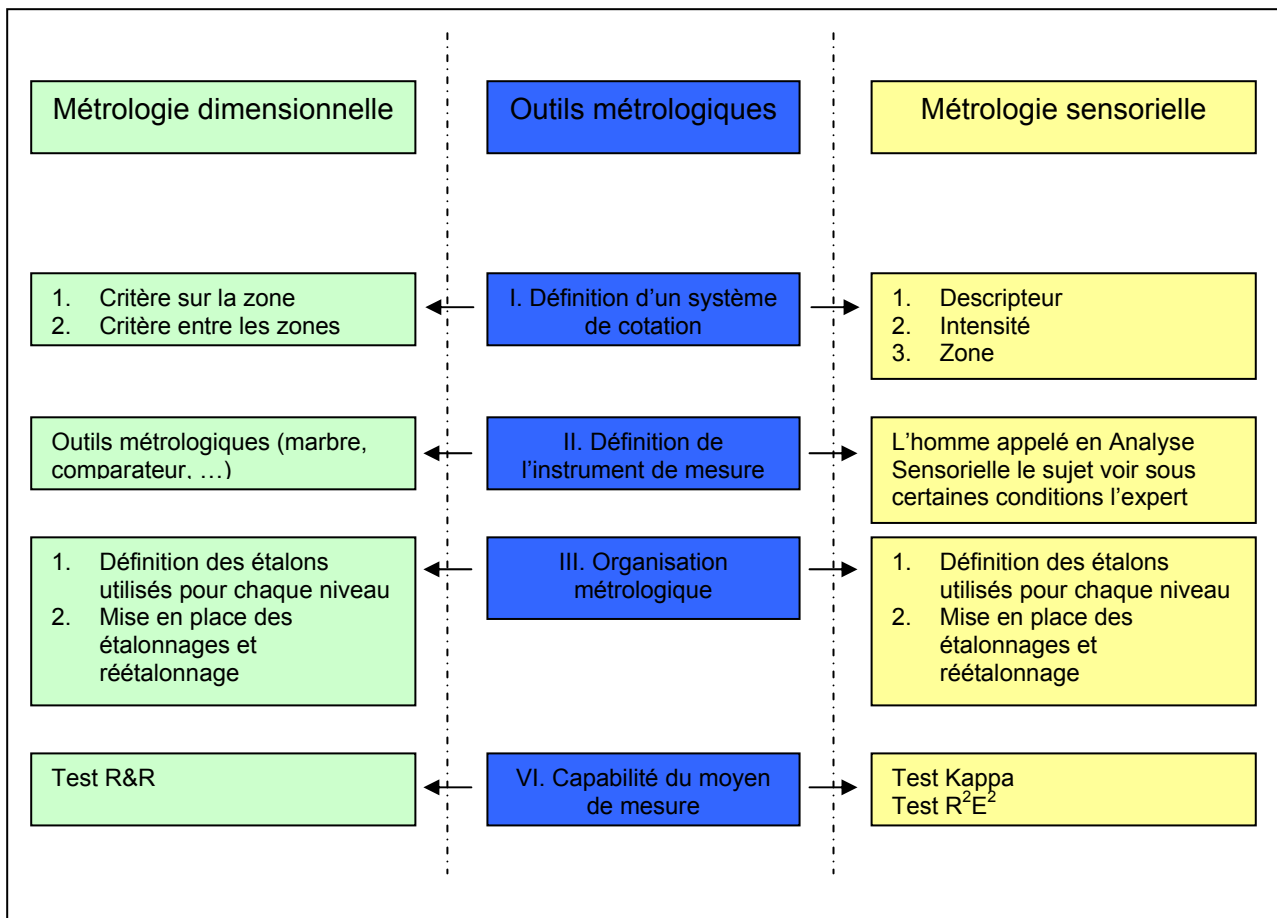


Figure 54 : Analogie Métrologie Dimensionnelle- Métrologie Sensorielle

Une métrologie dimensionnelle se base sur un découpage en zones en utilisant des critères sur chacune de ces zones (par exemple, le diamètre d'un arbre) et entre les zones (la perpendicularité d'un axe par rapport à un autre). Nous pouvons faire de même pour la métrologie sensorielle (par exemple, un critère sur zone sera l'occurrence d'une tâche et un critère entre zones sera la juxtaposition de deux composants dont la teinte est sensiblement différente).

Les outils métrologiques essentiellement développés pour la métrologie dimensionnelle font référence à la notion de système de cotation. En métrologie sensorielle, cela correspondrait à la notion de descripteur, d'intensité et de définition de la zone considérée.

A chaque système de cotation correspond un instrument de mesure choisi suivant les recommandations exposées au paragraphe 3.4.2. Dans le cas d'une métrologie sensorielle, l'instrument de mesure en question est l'homme. Même s'il peut être assisté par des outils visuels (une loupe par exemple.), l'homme en tant qu'instrument de mesure induit nécessairement une grande part de subjectivité dans l'évaluation et/ou le jugement. Cette subjectivité peut également s'accompagner d'une dérive de la mesure dans le temps. Afin de palier cette dérive, une organisation métrologique, du type de celle définie en métrologie dimensionnelle s'avère nécessaire, voire indispensable.

Concernant les différences entre les deux métrologies, nous avons retenu deux différences fondamentales.

La première différence concerne, nous l'avons dit, l'instrument de mesure. En effet, la métrologie sensorielle utilise l'homme comme instrument de mesure, ce qui induit une grande part de subjectivité dans les mesures.

La seconde différence concerne les étalons. Dans la métrologie dimensionnelle, il est généralement possible de fabriquer un étalon de référence qui permet dans le temps de valider l'absence de dérive. Dans le cas sensoriel, cela semble plus difficile. En effet, avec le temps, les surfaces peuvent se dégrader (oxydation, manipulation, poussières...) et ne pas permettre donc de garantir la constance de la mesure dans le temps.

Notre objectif est donc de concevoir un système métrologique adapté capable de prendre en compte ces deux différences fondamentales et qui puisse permettre de disposer d'une mesure :

- avec absence de biais
- à faible variabilité de répétabilité
- reproductible
- stable dans le temps

3.6 PROPOSITION D'UNE METROLOGIE SENSORIELLE

3.6.1 LE SYSTEME DE COTATION

Le système de cotation en métrologie sensorielle fait intervenir l'analyse sensorielle lors de l'évaluation des produits étudiés. Nous pouvons donc utiliser la démarche que nous avons exposée dans le chapitre 2, afin de définir :

- une liste de descripteurs,
- une échelle intensité,
- une localisation sur le produit si nécessaire, suivant le produit étudié.

Cette démarche est donc parfaitement utilisable pour décrire un système de cotation en métrologie sensorielle.

Nous sommes alors capable de proposer un tolérancement sensoriel comme le montre la Figure 55 :

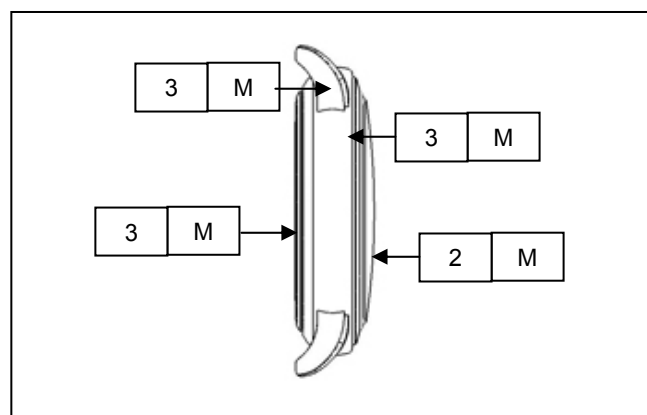


Figure 55 : Exemple de tolérancement sensoriel

Cet exemple utilise l'expertise d'évaluation que nous avons développé au chapitre 2. Il propose aussi pour chaque zone de la pièce, une tolérance associée à un descripteur, i.e. à une anomalie. Aussi, le tolérancement sensoriel est devenu possible pour effectuer et se reporter à des niveaux d'acceptabilité grâce à une démarche que nous proposons rendant mesurable ce qui au départ n'y était pas. La démarche a alors permis de créer un système de cotation sensoriel en analogie avec la métrologie dimensionnelle.

3.6.2 LES INSTRUMENTS DE MESURE

Même si certains instruments de mesure dits sensoriels tel que le doigt sensoriel... (cf chapitre 1) sont développés à l'heure actuelle, ils restent au stade expérimental et donc à un niveau non opérationnel dans des cadences de production. Le principal instrument de mesure en métrologie sensorielle est l'homme appelé sujet ou sous certaines conditions

expert (définition de ces termes au chapitre 1). Ces sujets vont alors répondre aux critères définis par l'analyse sensorielle : entraînement, expertise ... mais vont aussi et c'est ce que nous allons développer au paragraphe 3.6.4 être formé, étalonné et ré étalonné afin de répondre aux conditions imposées par toute métrologie.

3.6.3 L'ORGANISATION METROLOGIQUE

3.6.3.1 L'ARCHITECTURE DE LA METROLOGIE SENSORIELLE

La Figure 56 décrit l'architecture de la métrologie sensorielle que nous proposons.

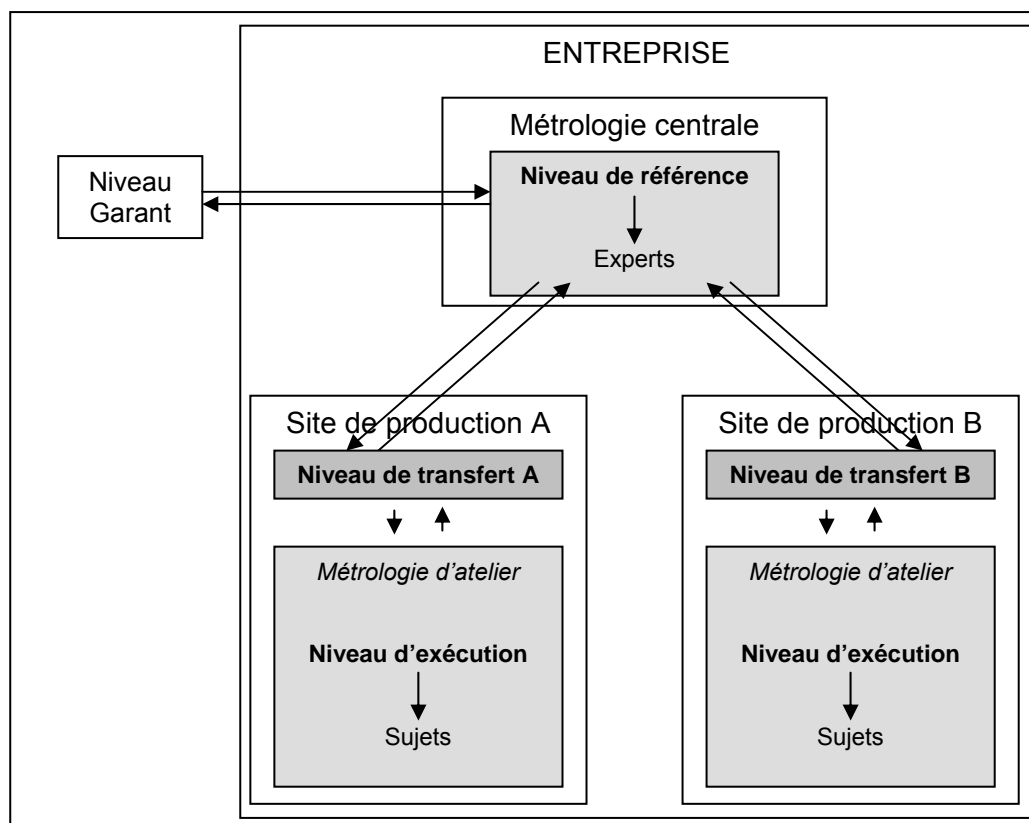


Figure 56 : Architecture Métrologie Sensorielle

Nous retrouvons donc trois niveaux d'étalonnage au sein de l'entreprise : le niveau d'exécution, le niveau de transfert et le niveau de référence. Ces niveaux d'étalonnage ont bien sûr leur propre qualification suivant leur position dans la hiérarchie :

- Le niveau d'exécution représente les sujets chargés d'effectuer la mesure en production.
- Le niveau de transfert est utilisé, comme en métrologie dimensionnelle, pour faire le lien entre le niveau d'exécution et le niveau de référence. C'est aussi la référence du site de production. En termes de métrologie sensorielle, ce rôle est détenu par des sujets qualifiés à effectuer la mesure avec une incertitude qui permet de gérer à tout moment les éventuelles dérives constatées dans l'application de la méthode de mesure.
- Le niveau de référence est tenu par des experts de la mesure. Ils sont entraînés à effectuer ensemble des mesures, ont en charge la définition de la référence et doivent garantir la stabilité de cette référence dans le temps. Ils doivent régulièrement étalonner et ré étalonner le niveau de transfert.

Pour chacun de ces trois niveaux et avec une tolérance plus ou moins importante selon leur niveau de précision dans la mesure, la capacité à appliquer correctement la démarche pour

effectuer la mesure va être vérifiée en utilisant un test Kappa et si nécessaire un test $R^2 \& E^2$ (voir paragraphe 2.2). Cette vérification permet alors de juger de l'aptitude des différents niveaux d'étalonnage et donc de qualifier chacun de ses niveaux.

3.6.4 LA CAPABILITE DU MOYEN DE MESURE

Comme en métrologie dimensionnelle, une capacité du moyen de mesure doit être définie afin de juger de l'aptitude de l'instrument de mesure à réaliser un mesurage juste. Pour cela, un test Kappa doit être effectué suivi, dans le cas où la variabilité du moyen de mesure est jugée comme insatisfaisante, d'un test $R^2 \& E^2$ qui aidera à identifier les causes de cette variabilité (exploration ou évaluation).

Il sera ensuite nécessaire de mettre en place tout un processus de qualification avec comme étapes : la formation, l'étalonnage et le suivi du moyen de mesure afin de garantir une capacité acceptable pour ce moyen. Ce processus visera donc à garantir une qualification pour chaque instrument mais également une qualification prenant en compte leur niveau dans l'organisation métrologique sensorielle. En effet, comme en métrologie dimensionnelle, chaque niveau se réfère à une qualification différente.

Rappelons que la qualification à obtenir pour chaque sujet doit couvrir les quatre exigences attendues pour un instrument de mesure, à savoir une absence de biais, une répétabilité et une reproductibilité acceptables une stabilité dans le temps. Les premières exigences sont assurées par la formation des sujets, la dernière par une évaluation périodique de leurs connaissances acquises durant le processus de qualification.

3.6.4.1 LA FORMATION

Il va de soi que toute personne devant effectuer une mesure doit suivre une formation, aussi bien avant sa première mesure qu'après, et cela de façon régulière avec une fréquence définie selon sa position dans l'organisation métrologique sensorielle. Cette formation se décompose en trois phases : une partie théorique, une partie pratique et une partie de qualification.

✕ *La partie théorique*

La partie théorique permet de sensibiliser le sujet à la nécessité d'utiliser de manière rigoureuse la méthode définie. Cette sensibilisation se déroule en deux temps. D'une part on lui expose quels sont les indicateurs de résultat qui ont été définis avant de mettre en place la méthode. D'autre et d'autre part en décrivant les étapes de la construction et de la validation de la démarche. Cette dernière est nécessaire afin de montrer toute l'importance de la méthode à suivre.

De plus, cette partie théorique liste toutes les étapes chronologiques à suivre lors de l'évaluation du produit : détection – appréciation – évaluation – décision. A chacune de ces étapes va donc être associée une procédure et/ou un document permettant de la réaliser.

L'étape de détection correspond à la partie exploration.

L'étape d'appréciation correspond à la première sensation perçue, visible ou non à l'œil.

L'étape d'évaluation correspond à la notion d'intensité de l'anomalie.

L'étape de décision correspond à l'association : descripteur – intensité – zone.

Cette partie théorique est réalisée par le niveau garant de la méthodologie (Figure 56). Il représente en quelque sorte un organe d'accréditation extérieur pouvant intervenir aussi dans les autres parties de la formation. Très impliqué dans les phases de préparation, de construction et de la validation de la démarche comme expérimentateur et donc comme personne neutre (ces phases faisant intervenir uniquement le niveau de référence), le garant peut à la fois et de manière aléatoire auditer chaque niveau en tant que formateur mais aussi en tant qu'instrument de mesure à étalonner.

✱ *La partie pratique*

Après avoir suivi quelques exemples concrets en transition de cette partie avec la partie théorique, le sujet suit une phase d'apprentissage sur le terrain. Cette phase lui permet, à chaque anomalie détectée, de s'entraîner à l'apprécier et à l'évaluer. Chaque évaluation est validée ou non par le niveau supérieur (par exemple, la formation du niveau d'exécution est réalisée par le niveau de transfert), responsable alors de cette partie pratique.

✱ *La partie de qualification*

Dans cette partie, il s'agit de tester la bonne compréhension et l'utilisation de la méthode par le niveau formé. Comme pour la partie pratique, le niveau de rang supérieur est en charge de réaliser un test Kappa, suivi si nécessaire d'un test $R^2 \& E^2$, afin de juger apte ou non le niveau évalué.

3.6.4.2 L'ETALONNAGE

Une fois que l'instrument de mesure a suivi sa formation avant d'être utilisé pour effectuer une quelconque mesure, un étalonnage est ensuite réalisé en utilisant les deux tests (Kappa et $R^2 \& E^2$). Cet étalonnage se base sur le même principe que l'étalonnage de la métrologie dimensionnelle : *définir la relation entre les valeurs indiquées par l'appareil et les valeurs matérialisées par les étalons*. De ce fait, lors de l'étalonnage du niveau de transfert, le niveau de référence représente *les valeurs matérialisées par les étalons* et lors de l'étalonnage du niveau d'exécution, c'est le niveau de transfert qui va alors représenter *les valeurs matérialisées par les étalons*. Avec ce système d'étalonnage, nous voyons donc bien apparaître le rôle pivot du niveau de transfert, jouant dans certains cas le rôle de valeurs étalons et dans d'autres cas celui d'instruments de mesure. Ce niveau possède donc une double compétence isole le niveau de référence du niveau d'exécution. Ce principe est important, et nous le verrons plus tard (Figure 57), si l'on veut garantir la stabilité de tous les niveaux dans leur mesure et empêcher une dérive commune des résultats.

3.6.4.3 LE SUIVI

✱ *L'évaluation périodique*

La formation et l'étalonnage ne garantissent pas la stabilité des connaissances acquises dans le temps. Comme dans toute organisation métrologique, il est en effet nécessaire de réétalonner l'instrument de mesure afin d'éviter toute dérive dans le temps. La fréquence de ce réétalonnage doit être définie en prenant en compte l'environnement et l'utilisation plus ou moins fréquente de l'instrument de mesure. Dans notre cas, chaque niveau est responsable du contrôle et du réétalonnage du niveau inférieur selon la fréquence établie préalablement définie. La fréquence de réétalonnage du niveau de référence sera ainsi plus faible que celle du niveau d'exécution nécessairement plus souvent sollicité et ayant donc tendance à dériver plus facilement.

L'évaluation périodique consiste alors à effectuer un test. Comme pour la partie de qualification de la formation, des produits sont présentés à chaque sujet et on leur demande d'évaluer les anomalies. Pour juger de l'aptitude des sujets, les résultats du test sont traités par le test Kappa et, si nécessaire, par le test $R^2 \& E^2$. Ces résultats sont alors comparés aux résultats donnés par le niveau supérieur. La reproductibilité entre les résultats du sujet et les résultats du niveau supérieur permettent d'évaluer l'absence de biais et la répétabilité valide la variabilité de la mesure. En cas d'échec à ce test, le sujet doit suivre à nouveau la formation.

× *Garantir la stabilité des différents niveaux*

- Le niveau de référence

Le niveau de référence est ainsi chargé de garantir le maintien des connaissances des sujets dans le temps. En tant que niveau le plus élevé dans l'organisation métrologique que nous proposons, il se doit de garder une stabilité au cours du temps et ne connaître aucune dérive dans la mesure.

Dans ce domaine, la littérature est assez pauvre. Bien sûr dans d'autres études de cas, cette garantie est maintenue par diverses stratégies. Citons par exemple le cas d'une évaluation sensorielle pour définir une odeur, la stabilité peut alors être maintenue par différentes odeurs tests créées grâce à des molécules chimiques [Meierhenrich et al., 2005]. La chimie utilisée va donc permettre de rejoindre le sensoriel en garantissant des étalons tests par composition chimique afin de pouvoir évaluer le niveau de référence et empêcher sa dérive dans le temps. Dans ce cas là, il sera ainsi possible de former ce niveau de référence directement sur la molécule chimique et non sur l'odeur comme le réalise l'Institut Français du Textile et de l'Habillement (Lille) demandant par exemple à ces sujets de reconnaître une odeur d'acide citrique et non de citron.

Dans notre cas d'étude, nous ne pouvons pas nous baser sur les mêmes principes. Aussi et c'est là l'une des plus grandes difficultés pour maintenir le savoir-faire de ce niveau de référence, les pièces que nous proposons lors des tests (qui sont des pièces de production) ne peuvent pas être conservées pour donner une référence. L'oxydation et l'altération par les différentes manipulations font que nous avons dû écarter cette méthode basée sur des pièces témoins, pouvant être similaire à la méthode que nous avons décrite de l'Institut Français du Textile et de l'Habillement (Lille).

Aussi, il nous est apparu difficile de développer des méthodes qui permettent de conserver une trace dans le temps afin d'évaluer ce niveau de référence sur des pièces étalons. Bien sûr comme le fait de garder des pièces pendant un certain temps n'était pas possible, nous avons pensé à utiliser des outils :

- la photographie des anomalies mais les différents angles de perception de l'anomalie (chapitre 2) font de cet outil, une méthode difficile à utiliser par les sujets lors de l'évaluation de l'anomalie. Les sujets ne peuvent pas avoir les mêmes sensations que lors d'une évaluation standard
- les cales étalons mais cette méthode est apparue difficile à réaliser car les anomalies sont pratiquement impossible à créer de manière artificielle. Chaque anomalie est différente ce qui fait la difficulté de réalisation de ces dernières.

La question qui se pose maintenant concerne la stabilité même de ce niveau de référence en l'absence d'étalons physiques. Pour garantir cette stabilité, nous avons fixé le nombre minimal de personnes constituant ce niveau de référence à quatre. L'hypothèse (réaliste dans notre cas pratique) que nous avons faite est qu'il existe une probabilité très faible que deux personnes quittent simultanément ce niveau. En cas de départ d'une personne, celle-ci est remplacée par un nouveau sujet qui s'étalonne sur les trois autres experts

La formation, l'étalonnage et la constitution de groupe de niveau avec différentes échelles d'importance et de qualification permettent de réduire de façon très significative la variabilité de la mesure.

De plus, nous avons tout de même voulu évaluer et donc contrôler la stabilité du niveau de référence par des pièces témoins. Comme nous l'avons vu ci-dessus, il est difficile de conserver des pièces étalons – cales ou pièces de production – pour différentes raisons que nous avons essayé d'expliquer. Cependant, nous avons choisi d'évaluer le niveau de référence sur des pièces évaluées *Non Conformes* prises en production où chacune des anomalies a été relevées. La première évaluation des sujets a donc lieu sur l'ensemble de ces pièces. Aussi, afin de répondre aux contraintes d'oxydation et d'altération de ces pièces la moitié sera remise dans le flux de production et l'autre moitié sera conservée pour le prochain test. Nous avons donc mis en place un roulement de pièces conservant d'un test à l'autre la moitié des pièces permettant alors une comparaison avec les résultats ultérieurs.

- Le niveau de transfert

Le niveau de transfert est quant à lui un niveau où les connaissances sont à la fois emmagasinées puis délivrées au niveau d'exécution. Ce niveau sert de transition entre les deux autres niveaux, le niveau de référence et le niveau d'exécution. Il permet donc d'isoler le niveau de référence du niveau d'exécution (Figure 57) Cette séparation est très importante pour éviter toute dérive à la fois du niveau de référence mais aussi du niveau d'exécution. Nous avons montré précédemment les précautions à prendre afin que le niveau de référence ne dérive pas et soit toujours le garant des connaissances à transmettre, mais sans cette séparation avec le niveau d'exécution, cette référence peut alors être compromise. En fait, le niveau d'exécution a tendance à dériver plus facilement. Par rapport au niveau de référence, ce niveau comporte en effet davantage de sujets et utilise sans cesse l'expertise d'exploration et l'expertise d'évaluation. Le niveau de transfert sert donc de tampon et permet alors de conserver la référence intacte détenue par le niveau de référence.

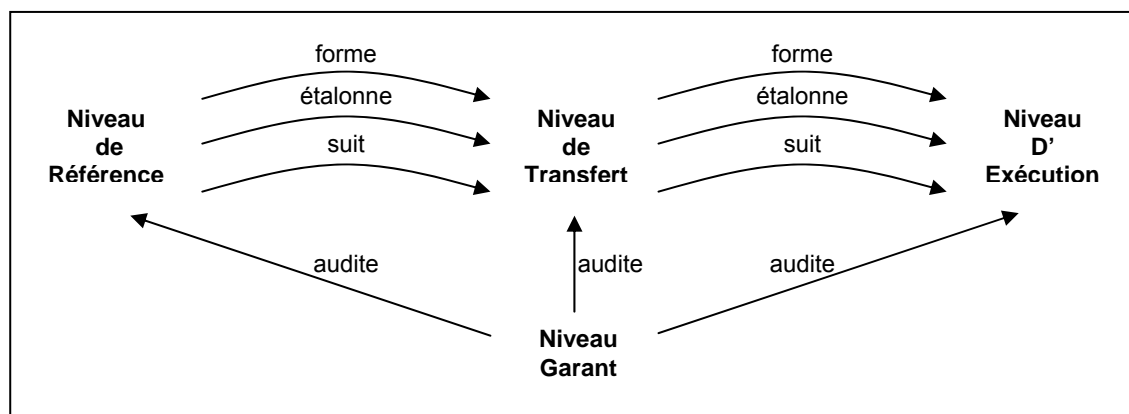


Figure 57 : Le niveau de transfert = un niveau pivot

- Le niveau d'exécution

Le niveau d'exécution, comme nous l'avons dit, est le niveau qui a tendance à dériver le plus. Ce niveau subira donc fréquemment des tests d'étalonnage faisant intervenir le test Kappa et, si nécessaire, le test R^2 & E^2 . Suivant les résultats de ces tests, il sera alors peut être obligé de refaire une formation à l'exploration et à l'évaluation pour être en situation de contrôler à nouveau les produits.

- Le niveau garant

Le niveau garant est un niveau d'audit des autres niveaux. Il n'est pas spécialiste de la perception ni de l'évaluation des pièces, il est présent afin de garantir la bonne utilisation de la méthode. Il peut à chaque instant auditer les formations données par les autres niveaux et mettre en place un test d'étalonnage lorsqu'il le juge nécessaire. Ce niveau garantit alors le bon fonctionnement et la mise en place de toute la démarche que nous avons décrite jusqu'à présent. A chaque instant, les différents niveaux peuvent faire appel à lui.

4 CONCLUSION

Dans le cas d'une évaluation aussi subjective, la nécessité de séparer toutes les étapes d'un contrôle qualité est primordiale. Nous avons décrit les limites du test R&R qui ne prend pas en compte cette distinction entre les étapes d'un contrôle et donc pour y remédier, proposé le test R²&E². Ce test permet de détailler l'origine d'une valeur insatisfaisante (répétabilité ou reproductibilité dans l'exploration ou l'évaluation) mise en évidence à l'aide du coefficient Kappa. Notre démarche donne la possibilité de prendre en considération l'intensité de l'anomalie et par conséquent, selon la zone où elle se situe, la gravité de cette anomalie. Les sujets peuvent alors être eux mêmes évalués et formés selon leur capacité à explorer et à évaluer.

Le sujet, i.e. l'instrument de mesure, est donc testé sur sa capacité à savoir effectuer une mesure correcte.

Cependant, le nouveau test que nous proposons est basé sur l'exploration et sur l'évaluation. Or même si cette dissociation est clairement formulée, elle n'est pas toujours évidente dans la réalité. En effet, il est difficile de juger de la capacité d'un sujet à évaluer si son exploration est jugée insuffisante.

La démarche a donc un inconvénient : si les sujets ne perçoivent pas les mêmes anomalies, il est difficile de valider qu'ils sont capables de les évaluer identiquement.

Pour palier à cette contrainte, nous proposons de réaliser un test préliminaire. Lors de sa réalisation, les anomalies à percevoir sur chaque produit du test sont indiquées. Dans ce cas, seules les anomalies repérées seront évaluées par les sujets. Ce test permettra aux sujets tout d'abord d'être validés capables ou non d'évaluer les anomalies avant même de les percevoir. Ce test reste un test préliminaire car il est bien sûr capital de valider à la fois l'exploration puis l'évaluation reprenant alors la démarche à suivre lors d'un contrôle visuel.

Ce nouveau concept répond certes à notre problématique mais nous voyons bien qu'il pourrait être appliqué totalement ou partiellement à d'autres cas et d'autres domaines où la subjectivité est un élément qu'il est nécessaire de prendre en compte.

A partir de la démarche que nous proposons, la variabilité de la mesure par les sujets peut alors être mesurée ce qui permet de percevoir toutes dérives. De ce constat, il est alors nécessaire de proposer une solution face à une variabilité qui serait trop importante ou tout simplement pour maintenir une variabilité tout à fait acceptable.

Nous avons donc proposé une démarche visant à maintenir ou à réduire la variabilité des mesures qualitatives. Cette démarche est fondée sur les principes de l'analyse sensorielle appliquée à une organisation métrologique. Notre approche peut donc être vue comme le développement d'une *organisation métrologique sensorielle*.

Jusqu'à maintenant nous avons parlé essentiellement d'exploration d'un produit et d'évaluation d'une anomalie. Or il serait à présent intéressant de considérer dans l'évaluation le produit dans sa globalité. En effet, le produit peut être composé de plusieurs anomalies. Mais alors, comment fait-on ? Quelle réponse doit-on donner ? L'objectif du chapitre 4 est alors de répondre entre autre à ces questions.

Chapitre 4

Evaluation d'un produit complexe sur la base de la perception sensorielle

1 INTRODUCTION

Nous avons décrit précédemment une démarche permettant d'évaluer une anomalie et de juger si celle-ci est acceptable ou non. Cette démarche, composée de plusieurs phases elles mêmes décomposées en étapes, inclut une méthode d'évaluation générique pouvant être appliquée à tout produit à évaluer à l'aide d'une perception sensorielle (chapitre 2). Nous avons ensuite vu dans cette évaluation comment diminuer la variabilité de la mesure en mettant en place une organisation métrologique sensorielle adaptée. Cette organisation reprend bien sûr les principes d'une organisation métrologique dimensionnelle mais prend également en compte les spécificités de l'aspect sensoriel : difficulté de conserver des étalons, subjectivité des mesures... Conformément aux préconisations de toute métrologie, cette organisation se base donc sur des aspects mesurables et des vérifications sur les mesures obtenues pour détecter ou/et limiter toute dérive de l'instrument de mesure dans le temps. Pour respecter cette condition primordiale, nous avons proposé un test mesurant la variabilité globale de la mesure ainsi que, et, quand cela est nécessaire, mesurant la répétabilité et la reproductibilité pour comprendre les causes de la variabilité détectée (chapitre 3).

L'objectif de ce chapitre est de proposer une démarche structurée capable de fournir une évaluation globale de la qualité d'un produit pouvant contenir plusieurs anomalies de différentes intensités sur plusieurs zones. Nous proposons pour cela une mesure inertielle de la qualité d'un produit évalué par l'analyse sensorielle. Nous nous intéresserons en effet à la manière dont un sujet estime la qualité globale d'un produit lors d'un examen visuel. Généralement, le sujet n'examine pas le produit dans sa globalité. Il l'examine plutôt de manière incrémentale, surface après surface, en recherchant les anomalies pouvant apparaître sur chacune de ces surfaces. Nous proposons donc dans ce chapitre une approche formelle de la description de l'évaluation du produit. Ce chapitre conclura donc sur la manière d'évaluer, non plus telle ou telle anomalie, mais un produit sur lequel a été détecté plusieurs anomalies. En fonction des évaluations des anomalies obtenues avec la

méthode que nous avons présentée, il s'agit maintenant d'aider le sujet à décider de l'acceptabilité ou non du produit. Cette décision relève donc d'une agrégation d'évaluations réalisées sur des anomalies perçues sur un produit. Ce chapitre vise alors à proposer une solution permettant une automatisation de cette prise de décision. Notons dès à présent que cette problématique de recherche d'un résultat global est peu présente dans le domaine de l'Analyse Sensorielle, celle-ci cherchant le plus souvent à relever les caractéristiques spécifiques d'un produit plutôt que d'en obtenir une description globale.

2 QUANTIFIER PAR UNE MESURE LA PERCEPTION GLOBALE D'UNE SURFACE OU D'UN PRODUIT

La perception globale d'un produit se base, et c'est là notre hypothèse, sur une série de perceptions successives d'anomalies perçues zone après zone, ou plus généralement surface après surface, sur ce produit. Ce processus d'évaluation, par nature très incrémental a donc pour effet de se passer des interprétations personnelles sur le produit que pourrait fournir le sujet.

2.1 ARBORESCENCE DES ELEMENTS D'APPRECIATION D'UN PRODUIT LORS D'UN EXAMEN VISUEL

Un produit, dans le cadre industriel étudié dans ce travail de recherche, est toujours constitué de plusieurs surfaces. Chacune de ses surfaces peut donc être successivement examinée pour détecter les anomalies présentes sur le produit. Chaque anomalie peut être relevée en utilisant l'un des descripteurs choisis parmi ceux d'une liste définie au préalable puis évaluée à l'aide d'une intensité se référant à une échelle sémantique, comme par exemple, celle de Likert [Rasmussen, 1989] proposée dans le chapitre 2. Pour chaque couple descripteur/surface, il s'agit de déterminer le niveau maximal de l'intensité de l'anomalie que l'on tolère. Si nous continuons le parallèle du chapitre 3 avec la métrologie dimensionnelle, nous pouvons comparer ce niveau maximal à une limite de tolérance supérieure. Si la mesure est en dessous de cette limite, l'anomalie est acceptable, si elle est au dessus l'anomalie est refusée.

La Figure 58 montre cette arborescence.

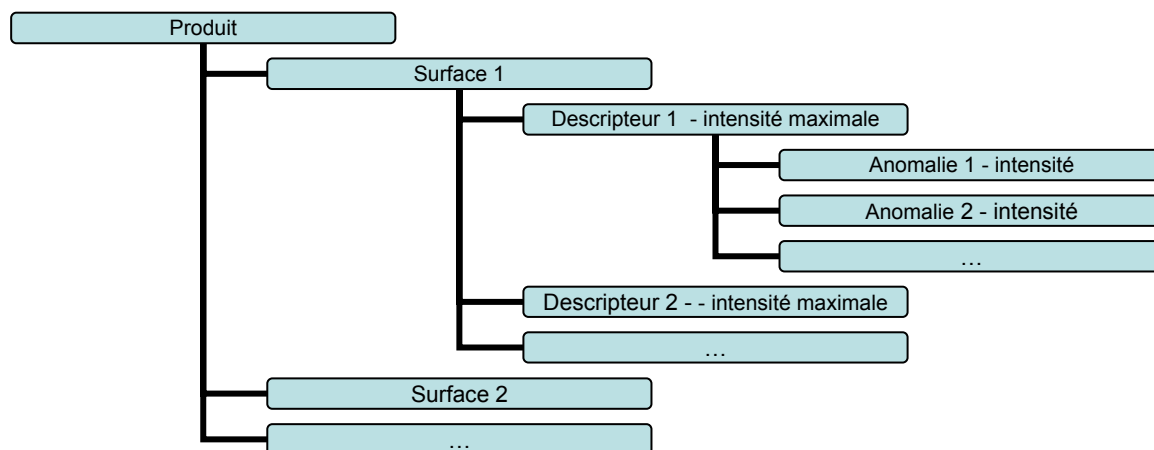


Figure 58 : Arborescence de description sensorielle d'un produit

Il faut aussi rappeler qu'un descripteur peut être représenté sur la surface par plusieurs anomalies, chacune d'elle ayant sa propre intensité. Par exemple, le sujet peut percevoir plusieurs marques d'intensité différente sur une même surface et les décrire à l'aide de l'unique descripteur *Marque*.

Prenons l'exemple d'une montre pour illustrer ce processus d'évaluation. Une montre est composée de plusieurs parties (par exemple, tête de montre, bracelet, fermoir, etc.) elles même respectivement composées de plusieurs surfaces (par exemple de cornes, fond,

glace, etc. pour une tête de montre). Sur chaque surface, plusieurs anomalies peuvent être détectées (par exemple, *Marque*, *Tache*, *Déformation*, *Particule*, etc.), chacune d'elles étant évaluée selon une échelle d'intensité allant de 1 à 6.

Supposons que le sujet détecte sur le fond de la montre deux marques et une tache d'intensités respectives égales à 3, 5, 6. Supposons également que les limites de tolérance du couple Marque/Fond et du couple Tache/Fond aient été fixées à 4. Nous pouvons donc en déduire que seule la première marque de valeur d'intensité à 2 est acceptable, l'autre marque de valeur d'intensité égale à 5 devant être refusée (Figure 59).

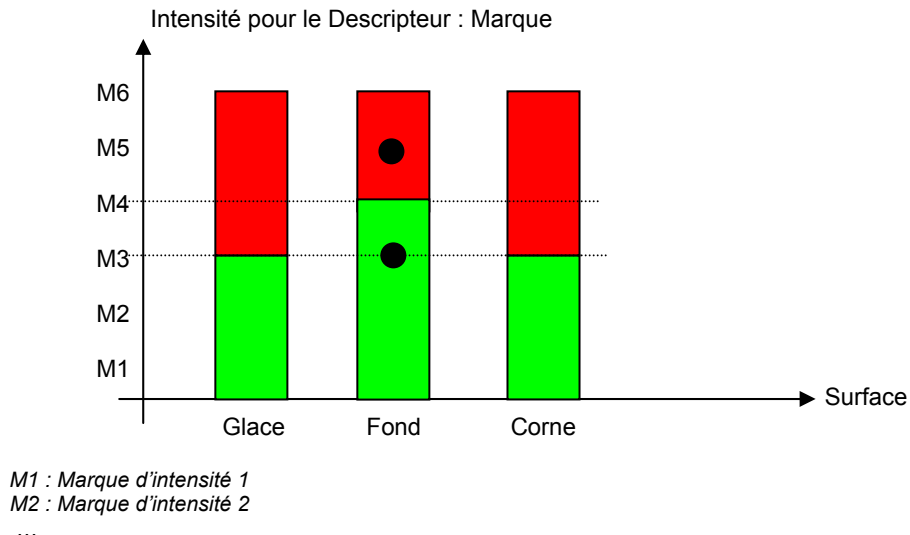


Figure 59 : Limites de tolérance en fonction du couple Descripteur/Surface

Mais que faut-il en conclure pour autant sur le produit ? Doit-il être accepté ?

Pour répondre à cette question, il s'agit d'être capable d'apporter des réponses à plusieurs problèmes parmi lesquels :

- P1 - Comment évaluer la qualité d'une surface présentant une seule anomalie décrite à l'aide d'un seul descripteur ?
- P2 - Comment évaluer la qualité d'une surface présentant plusieurs anomalies décrites à l'aide d'un seul descripteur ?
- P3 - Comment évaluer la qualité d'une surface présentant des anomalies décrites à l'aide de plusieurs descripteurs ?
- P4 - Comment évaluer la qualité d'un produit présentant des anomalies sur plusieurs surfaces ?

Nous allons alors tenter de répondre à chacun de ces problèmes avec au final l'objectif de répondre au problème que pose toute évaluation : doit-on accepter le produit ou non ?

2.2 EVALUATION D'UNE SURFACE PRESENTANT UNE ANOMALIE DECRITE A L'AIDE D'UN SEUL DESCRIPTEUR

Cette partie traite du cas où le sujet ne perçoit qu'une anomalie sur une surface du produit et décrit donc cette anomalie à l'aide d'un seul descripteur (Figure 60).

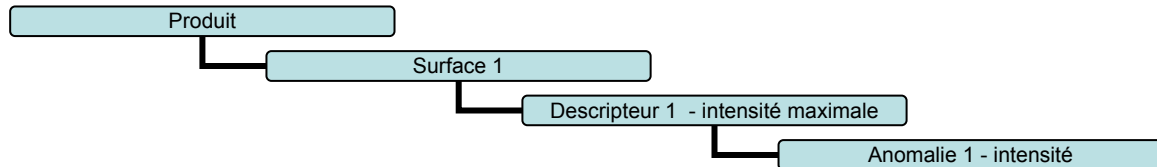


Figure 60 : 1^{ère} arborescence – Une anomalie sur un produit

2.2.1 HYPOTHESE

Le sujet évalue l'intensité d'une anomalie en se référant, nous l'avons dit, à une échelle sémantique. Supposons par exemple que cette échelle varie de 1 à 6. Il est vraisemblable que la perception ne suive pas une linéarité aussi parfaite que celle de l'échelle. Par exemple, l'écart ressenti par le sujet entre le différentiel de 4 à 5 est sans doute plus important que le différentiel de 1 à 2. Nous considérons donc, et c'est là notre hypothèse de départ, que la perception de ce différentiel de la part d'un sujet est proportionnelle au carré de la valeur de l'intensité sur l'échelle sémantique.

Pour valider cette hypothèse, nous avons réalisé un test *2 parmi 5* utilisé en analyse sensorielle. Ce test consiste à présenter aux sujets cinq échantillons de produits dont deux sont issus d'un groupe A et trois d'un groupe B. L'ordre de présentation des échantillons pour chaque sujet est établi au préalable. L'objectif assigné à chaque sujet est de réassocier correctement chaque échantillon au groupe d'où il provient. Ce test nécessite environ 10-12 sujets avec une probabilité de 0,1 d'arriver au bon résultat par hasard.

Dans notre cas, nous avons donc demandé à 10 sujets de constituer deux groupes de produits à partir des produits qui leur ont été présentés (un groupe de 2 produits, l'autre de 3 produits). Nous avons repéré par un point rouge l'anomalie à évaluer : une *Marque* sur un *Fond*. La consigne donnée aux sujets était de constituer 2 groupes de produits en fonction de l'intensité de la Marque qu'il percevait.

Les résultats ont été ensuite comparés avec ceux des experts, à savoir un groupe de 2 produits présentant une Marque d'intensité égale à 5 et un groupe de 3 produits présentant une Marque d'intensité égale à 4 (Tableau 1).

Ordre de présentation	Sujet	Regroupement bon
AABBB	Sujet 1	Oui
ABABB	Sujet 2	Oui
ABBAB	Sujet 3	Oui
ABBBA	Sujet 4	Oui
BAABB	Sujet 5	Oui
BABAB	Sujet 6	Oui
BABBA	Sujet 7	Oui
BBAAB	Sujet 8	Non
BBABA	Sujet 9	Non
BBBAA	Sujet 10	Oui

Tableau 33 : Ordre de présentation des produits pour chaque sujet – Intensités 4 et 5

Chaque sujet a donc évalué, en utilisant la démarche définie au chapitre 2, l'anomalie sur une échelle d'intensité de 1 à 6. Nous retrouvons dans la dernière colonne du Tableau 33 les résultats du test, la réponse *Oui* indiquant que les groupes constitués étaient bons et la réponse *Non* indiquant que les groupes constitués n'étaient pas ceux attendus.

Nous voyons donc que sur dix sujets seuls deux n'ont pas fait correctement les regroupements.

Pour évaluer s'il y a présence d'une différence significative entre les deux intensités 4 et 5 en fonction des résultats obtenues par l'expérience, nous utilisons les préconisations de [SSHA, 1998]. Il s'agit alors de calculer le risque réel en additionnant les probabilités de tous les événements correspondants à un nombre de réponses supérieur ou égal au nombre de réponses correctes réellement obtenues.

$$risque = \sum_{r=k}^n P(X = r) \quad \text{Équation 55}$$

avec

n : le nombre de sujets

k : le nombre de réponses correctes

et X suivant une loi binomiale B(n, 1/10)

Dans notre cas, nous avons 10 sujets, 8 réponses correctes correspondent à une probabilité de : $P(X=8) + P(X=9) + P(X=10) = 0$.

Nous choisissons d'accepter de prendre un risque α de 5%.

La probabilité ainsi obtenue étant inférieure à 5%, on peut conclure à l'existence de différences perçues entre des produits ayant des anomalies d'intensité 4 et d'intensité 5.

Nous avons fait de même avec cinq autres produits, deux ayant une *Marque* sur un *Fond* d'intensité 1 (produit A) et trois ayant une *Marque* sur un *Fond* d'intensité 2 (produit B).

Nous avons procédé comme précédemment.

Le Tableau 34 nous montre les résultats obtenus.

Ordre de présentation	Sujet	Regroupement bon
AABBB	Sujet 1	Non
ABABB	Sujet 2	Non
ABBAB	Sujet 3	Non
ABBBA	Sujet 4	Oui
BAABB	Sujet 5	Non
BABAB	Sujet 6	Oui
BABBA	Sujet 7	Oui
BBAAB	Sujet 8	Non
BBABA	Sujet 9	Non
BBBAA	Sujet 10	Non

Tableau 34 : Ordre de présentation des produits pour chaque sujet – Intensités 1 et 2

Nous voyons donc que sur dix sujets, sept n'ont pas fait correctement les regroupements et trois ont fait correctement les regroupements.

La présence d'une différence non significative entre les deux intensités 1 et 2 en fonction des résultats obtenues par l'expérience, est montrée comme suit :

$$P(X=3)+P(X=4)+P(X=5)+P(X=6)+P(X=7)+P(X=8)+P(X=9)+P(X=10) \\ =0,057+0,011+0,001=0,069 \text{ soit } 7\%$$

Cette probabilité étant supérieure à 5%, le risque de conclure que les produits ayant des anomalies d'intensité 1 et d'intensité 2 sont différents est supérieur à notre tolérance.

Les résultats ainsi obtenus nous ont permis de valider que l'écart ressenti entre le différentiel de 4 à 5 est plus important que le différentiel de 1 à 2. En effet, les regroupements effectués sont nettement plus corrects sur des produits avec des intensités 4 et 5 que sur des produits avec des intensités 1 et 2.

La différence entre les intensités 1 et 2 a donc été plus difficilement perçue par les sujets que la différence entre les intensités 4 et 5. Cela montre ainsi que l'écart entre les intensités 4 et 5 est supérieur qu'entre les intensités 1 et 2. Nous avons donc validé notre hypothèse de départ sur cette notion de perte quadratique : la perception de ce différentiel est proportionnelle au carré de la valeur de l'intensité sur l'échelle sémantique.

2.2.2 FONCTION PERTE

Cette hypothèse de valorisation de la perte proportionnelle à l'écart quadratique à la cible est conforme au modèle proposé par Taguchi [Taguchi, 1987].

2.2.2.1 NOTION DE PERTE

Nous pouvons lier la perception de la perte de qualité avec la relation de la perte financière par la relation :

$$L(x) = kx^2$$

Équation 56

avec

L : La perte financière

k : une constante

x : l'intensité de la perception sensorielle

La spécification peut être définie de manière économique comme égale au coût d'un rebut (ou d'une retouche). En effet, si le coût de non qualité est supérieur à cette limite, l'entreprise a intérêt à engager la dépense pour réduire le coût de non qualité. Dans le cas contraire, si le coût de l'intervention est supérieur au coût de non qualité l'entreprise a intérêt à accepter le produit.

Pour un descripteur, l'intensité de l'anomalie est comprise sur une échelle de 1 à 6. En fonction du descripteur et de la surface considérée, on fixe une limite d'acceptation de l'anomalie. Par exemple pour une *Marque*, l'anomalie est acceptable jusqu'à un niveau de 3 si elle est sur une surface cachée dans le produit fini et jusqu'à un niveau de 2 si elle est sur une surface visible. Pour chaque couple Descripteur/Surface, une limite supérieure d'acceptation (USL) est donnée.

Pour calculer k, on suppose que la perte $L(x)$ est égale à une unité lorsque l'intensité de l'anomalie est égale à la tolérance. La valeur de k est ainsi déterminée par la relation :

$$k = \frac{1}{USL^2} \quad \text{Équation 57}$$

L'objectif de l'application étant d'agréger différentes anomalies sur un même produit, la valeur du produit peut être ramenée à une unité standard.

Application

Une surface peut avoir 4 types d'anomalie représentés par les descripteurs D1 à D4.

Descripteurs	USL	$k = \frac{1}{USL^2}$	Perte $L(x)$
D1	2.5	0.160	$0.160 x^2$
D2	3.5	0.082	$0.082 x^2$
D3	3.5	0.082	$0.082 x^2$
D4	2.5	0.160	$0.160 x^2$

Tableau 35 : Calcul de la fonction Perte

Les tolérances (USL) sont placées à l'intersection de deux classes de l'échelle de Likert. Pour le descripteur D1 une anomalie de niveau 2 est acceptée, une anomalie de niveau 3 est refusée.

Pour chaque descripteur, une Perte $L(x)$ peut ainsi être définie (0,160 x^2 par exemple pour D1). Il est donc possible d'accepter ou de refuser une anomalie en examinant si cette valeur est inférieure ou non à 1. Si $L(x) \leq 1$, elle est acceptée, refusée sinon.

Par exemple, une anomalie sur un descripteur D3 évalué au niveau 2, et donc de perte $L(x) = 0.082 \times 2^2 = 0.327$, sera acceptée.

Cette fonction Perte $L(x)$ permet donc de répondre au problème P1 - Comment évaluer la qualité d'une surface présentant une seule anomalie décrite à l'aide d'un seul descripteur ?

2.3 EVALUATION D'UNE COMBINAISON DE PLUSIEURS ANOMALIES SUR UNE SURFACE

La perception de la non-qualité liée à la combinaison de plusieurs anomalies présentes sur une surface diffère selon les situations. En effet, ces anomalies peuvent être associées à un même descripteur ou à des descripteurs différents. De plus, elles peuvent être toutes de même intensité ou d'intensités différentes.

La combinaison de toutes ces situations rend difficile la possibilité d'émettre une seule règle générique applicable à toutes les configurations possibles. Notre objectif est donc de proposer une démarche permettant d'accepter ou non un produit à partir d'une description de l'ensemble des anomalies détectées sur ce produit. En partant d'hypothèses émises lors d'audits, que nous prendrons soin de valider, nous détaillons ci-après cette démarche.

2.3.1 COMBINAISON QUADRATIQUE : POUR UN DESCRIPTEUR SUR UNE SURFACE

Nous poursuivons d'abord la démarche proposée pour une seule anomalie (voir paragraphe 2.1) en examinant son application dans le cas de deux anomalies associées au même descripteur et relevées sur une même surface (Figure 61).

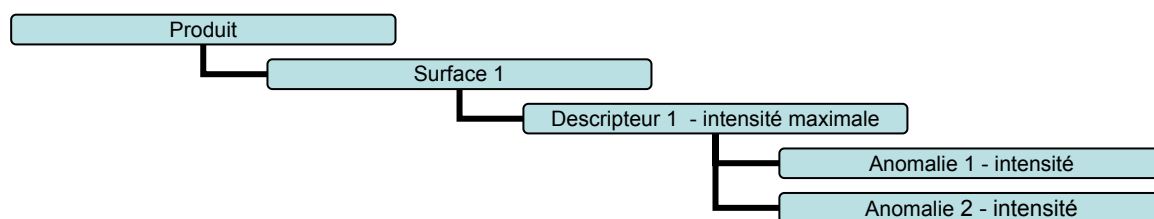


Figure 61 : 2^{ème} arborescence – 2 anomalies associées à un même descripteur et présentes sur une même surface

De façon expérimentale, nous pouvons dire que dans le cas où plusieurs anomalies d'un même descripteur sont présentes simultanément sur une même surface, le cumul des anomalies acceptables ne correspond pas à l'addition des intensités (par exemple un client acceptera plutôt six petites anomalies d'intensité 1 que deux anomalies plus importantes d'intensité 3). Notre approche ne se base donc pas sur une addition des intensités mais sur une combinaison quadratique de ces anomalies.

Hypothèse

Les anomalies associées à un même descripteur et présentes sur une même surface sont pondérées dans la réponse finale avec leurs intensités respectives. Dans ces conditions, la présence d'une anomalie sur le descripteur limite le niveau d'acceptation possible de la seconde anomalie sur le même descripteur. Nous allons donc tenir compte à la fois de l'intensité de chaque anomalie mais aussi du nombre d'anomalies présentes sur la surface. Nous faisons donc l'hypothèse que l'ensemble des anomalies, de part leur intensité, d'un même descripteur forme une combinaison quadratique. Cette dernière permettra alors de faire ressortir l'intensité globale perçue pour le descripteur en question. (Figure 62)

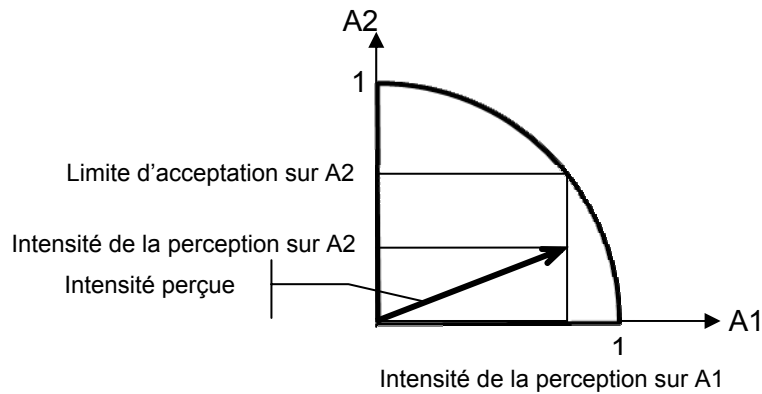


Figure 62 : Combinaison quadratique des anomalies sur un même descripteur

Validation de l'hypothèse

Pour valider cette hypothèse, nous avons réalisé un test *triangulaire* utilisé en analyse sensorielle. Ce test consiste à présenter aux sujets trois échantillons de produits avec deux de ces échantillons totalement identiques. Chaque sujet doit déterminer l'échantillon différent des deux autres. Ce test nécessite plus de dix-huit sujets avec une probabilité égale à de 1/3 de former correctement par le simple fait du hasard les deux groupes d'échantillons. Les six ordres de présentation possibles des échantillons doivent être utilisés un même nombre de fois.

Dans notre cas, nous avons réalisé ce test avec 18 sujets avec 3 produits. :

- un produit (code A) présentant 6 anomalies d'intensité égale à 1 sur un même descripteur,
- deux produits identiques (codes B1 et B2) présentant 2 anomalies d'intensité égale à 3 sur un même descripteur.

La consigne donnée aux sujets était de construire deux groupes, un groupe de produit(s) acceptable(s) et un groupe de produit(s) non acceptables.

Ordre de présentation	Sujet	Regroupement bon
AB1B2	Sujet 1	Oui
B1AB2	Sujet 2	Oui
B1B2A	Sujet 3	Non
AB2B1	Sujet 4	Oui
B2AB1	Sujet 5	Non
B2B1A	Sujet 6	Oui
AB1B2	Sujet 7	Oui
B1AB2	Sujet 8	Oui
B1B2A	Sujet 9	Oui
AB2B1	Sujet 10	Non
B2AB1	Sujet 11	Oui
B2B1A	Sujet 12	Oui
AB1B2	Sujet 13	Oui
B1AB2	Sujet 14	Non
B1B2A	Sujet 15	Oui
AB2B1	Sujet 16	Non
B2AB1	Sujet 17	Non
B2B1A	Sujet 18	Oui

Tableau 36 : Regroupement du test triangulaire

Sur 18 sujets, seuls 6 n'ont pas fait correctement le regroupement.

Comme le test 2 *parmi* 5, le test triangulaire utilise l'Équation 55, mais avec cette fois une variable X suivant une loi binomiale B(n, 1/3).

Douze regroupements corrects correspondent à une probabilité de :

$$P(X=12) + \dots + P(X=18) = 0.003$$

Acceptant un risque α de 5% et la probabilité obtenue étant inférieure à 5%, nous concluons à l'existence d'une différence significative. Un client acceptera donc plus facilement 6 anomalies d'intensité égale à 1 que 2 anomalies seulement mais d'intensité égale à 3.

Calcul de la perte dans le cas de plusieurs anomalies sur une même surface

Dans le cas où deux anomalies sont présentes, la perte pour le descripteur en question sera calculée par l'équation suivante :

$$L_{\text{Descripteur}} = \sqrt{L_{\text{Anomalie1}}^2 + L_{\text{Anomalie2}}^2} \quad \text{Équation 58}$$

Ce qui donne en utilisant l'Équation 56:

$$L_{\text{Descripteur}} = \sqrt{(kx_{A1}^2)^2 + (kx_{A2}^2)^2} \quad \text{Équation 59}$$

D'où l'équation générale :

$$L_{\text{Descripteur}} = \sqrt{\sum_{\text{Anomalies}} (kx_{Ai}^2)^2} \quad \text{Équation 60}$$

En reprenant l'exemple cité précédemment, nous pouvons donc dire qu'une surface sur laquelle 6 anomalies sur le descripteur D3 (USL=3.5) d'intensité égale à 1 sont présentes est acceptée. En effet :

$$L_{D3} = (0.082 \times 1^2)^2 + (0.082 \times 1^2)^2 + (0.082 \times 1^2)^2 + (0.082 \times 1^2)^2 + (0.082 \times 1^2)^2 + (0.082 \times 1^2)^2 = 0.20 \quad (\leq 1)$$

Une surface sur laquelle 2 anomalies sur le descripteur D3 (USL=3.5) d'intensité égale à 3 sont présentes est refusée. En effet :

$$L_{D3} = (0.082 \times 3^2)^2 + (0.082 \times 3^2)^2 = 1.04 \quad (>1)$$

L'utilisation de la Perte $L_{\text{Descripteur}}$ permet de répondre au problème P2 - Comment évaluer la qualité d'une surface présentant plusieurs anomalies décrites à l'aide d'un seul descripteur ?

2.3.2 COMBINAISON QUADRATIQUE : POUR PLUSIEURS DESCRIPTEURS SUR UNE SURFACE

Nous poursuivons d'abord la démarche proposée pour une seule anomalie (voir paragraphe 2.1) en examinant son application dans le cas de plusieurs anomalies associées à des descripteurs différents (Figure 63).

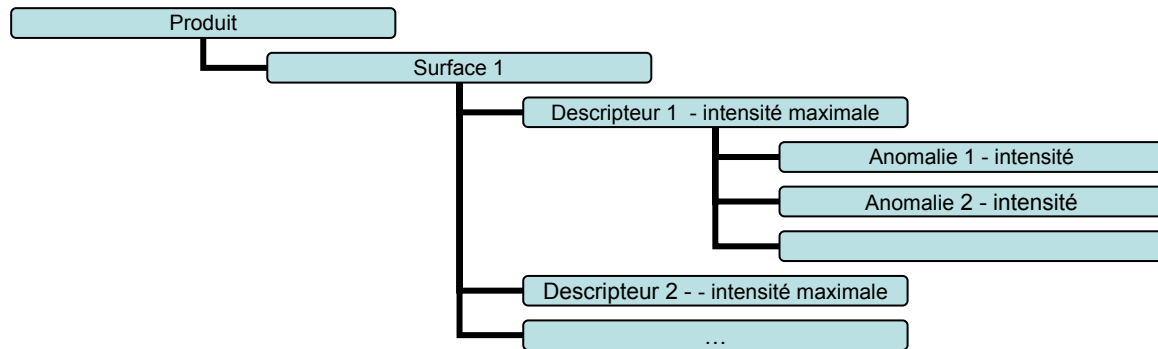


Figure 63 : 3^{ème} arborescence – Plusieurs anomalies associées à différents descripteurs et présents sur une même surface

Nous utilisons la même démarche qu'auparavant en utilisant une combinaison des anomalies correspondant à une combinaison quadratique des perceptions. L'absence d'anomalie sur un des descripteurs permet d'accepter des anomalies sur le second descripteur jusqu'à la limite de la perte unité. La présence d'une anomalie sur un des descripteurs limite le niveau d'acceptation possible de la perte sur le second descripteur. Par conséquent, l'ensemble des descripteurs, de part leur intensité, d'une même surface forme une combinaison quadratique. Cette dernière permettra alors de faire ressortir l'intensité globale perçue pour la surface en question. (Figure 64)

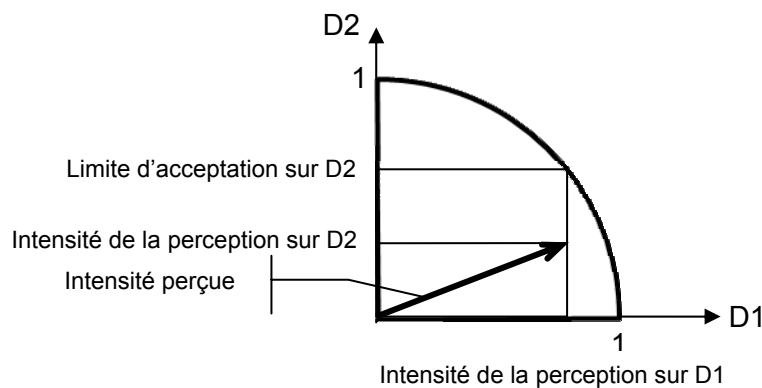


Figure 64 : Combinaison quadratique des anomalies sur plusieurs descripteurs

Dans le cas où la combinaison de deux anomalies sur des descripteurs différents est présente, le calcul de l'intensité perçue se calcule par la relation :

$$L_{Surface} = \sqrt{L_{Descripteur1}^2 + L_{Descripteur2}^2}$$

Équation 61

Dans le cas où plusieurs anomalies sont présentes simultanément sur une même surface, la perte se calcule par la relation.

$$L_{Surface} = \sqrt{\sum_{descripteurs} (L_{Descripteur})^2} \quad \text{Équation 62}$$

Application

Une surface peut être évaluée selon 4 descripteurs prédéfinis que l'on peut nommer *D1*, *D2*, *D3* et *D4*. Le Tableau 37 donne les descripteurs, le nombre et l'intensité des anomalies perçues.

Descripteurs	Intensités						USL	K	Perte	
	1	2	3	4	5	6			$L_{Descripteur}$	$Perte^2$
D1	2	1					2,5	0,160	0,679	0,461
D2		1					3,5	0,082	0,327	0,107
D3	1		1				3,5	0,082	0,739	0,546
D4							2,5	0,160	0,000	0,000
Somme										1,114
Perte de la surface										$L_{Surface}$
										1,055
Décision										Refusée

Tableau 37 : Tableau d'évaluation d'une surface comportant plusieurs anomalies

La surface est refusée alors que chaque descripteur individuellement est accepté.

Dans cette application, la surface considérée présente donc trois anomalies de type *D1* (deux d'intensité égale à 1 et une d'intensité égale à 2), une anomalie de type *D2* (d'intensité égale à 2) et deux anomalies de type *D3* (une d'intensité égale 1 et une d'intensité égale 3). La tolérance pour chacun de ces descripteurs (colonne USL) permet ensuite de calculer le coefficient k et la Perte $L_{Descripteur}$ (Équation 60).

Il est ensuite possible de calculer la Perte totale $L_{Surface}$ (Équation 62).

Dans notre application, la perte sur la surface est de 1.055. Cette perte étant supérieure à l'unité, la surface est refusée.

On note que la seule présence d'une seule anomalie dépassant la limite d'acceptation conduit au rejet de la surface car la perte totale de la surface est supérieure à l'unité. (Tableau 38)

Descripteurs	Intensités						USL	K	Perte	
	1	2	3	4	5	6			$L_{\text{Descripteur}}$	$Perte^2$
D1			1				2,5	0,160	1,440	2,074
D2							3,5	0,082	0,000	0,000
D3							3,5	0,082	0,000	0,000
D4							2,5	0,160	0,000	0,000
Somme										2,074
Perte de la surface										L_{Surface}
										1,440
Décision										Refusée

Tableau 38 : Tableau d'évaluation d'une surface comportant une anomalie inacceptable

L'utilisation de la Perte L_{Surface} permet de répondre au problème P3 - Comment évaluer la qualité d'une surface présentant des anomalies décrites à l'aide de plusieurs descripteurs ?

2.4 EVALUATION D'UNE COMBINAISON DE PLUSIEURS ANOMALIES SUR PLUSIEURS SURFACES

Un produit comme une montre est constitué de l'association de plusieurs surfaces. Dans l'évaluation globale du produit, il s'agit donc de prendre en compte ces différentes surfaces ainsi que la perception fournie par l'ensemble de ces surfaces (Figure 65).

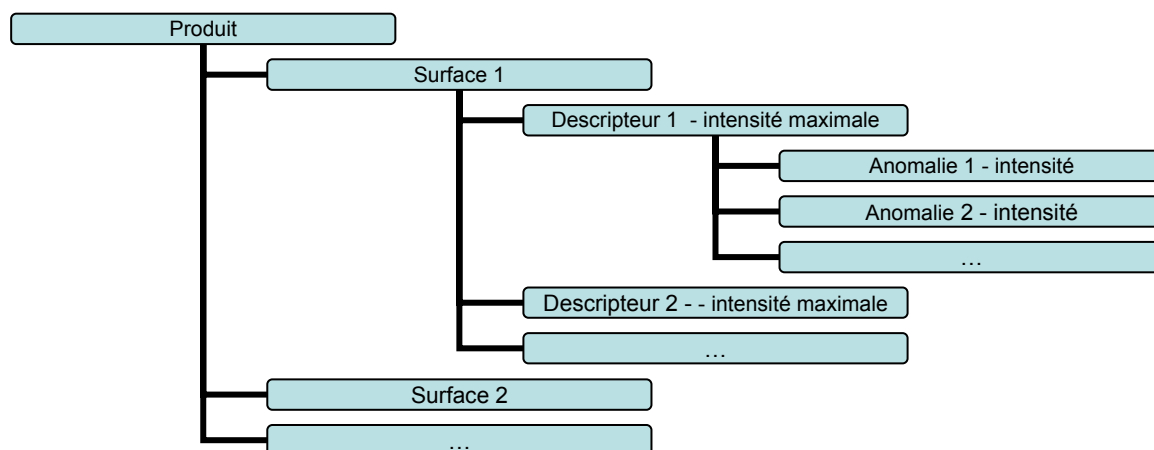


Figure 65 : 4^{ème} arborescence – Plusieurs anomalies associés à plusieurs descripteurs sur différentes surfaces

Comme dans le cas de la coexistence de plusieurs anomalies dans des descripteurs différents, il n'y a pas indépendance totale entre l'évaluation des surfaces. Mais il n'y a pas non plus cumul de cette perception. L'apparition d'une anomalie sur une surface rendra plus sévère le niveau d'acceptation sur l'autre surface. La combinaison des pertes est donc modélisée dans ce cas par une combinaison quadratique.

La Perte $L_{Produit}$ sur un produit se calcule donc par la relation :

$$L_{Produit} = \sqrt{\sum_{surfaces} (L_{Surface})^2} \quad \text{Équation 63}$$

Cette équation peut se développer pour être exprimée en fonction de l'ensemble des anomalies observées sur le produit.

$$L_{Produit} = \sqrt{\sum_{surfaces} \left(\sqrt{\sum_{descripteurs} \left(\sqrt{\sum_{anomalies} kx^2} \right)^2} \right)^2} \quad \text{Équation 64}$$

Un produit sera donc individuellement acceptable si sa perte est inférieure à l'unité.

Application

Considérons un produit constitué d'une surface S1, S2 et S3 (valeurs $L_{Surface}$ du Tableau 37) et deux autres surfaces S2 et S3 (Tableau 39).

Surface	Perte de la Surface $L_{Surface}$	Perte ²
S1	1,055	1,113
S2	0,106	0,011
S3	0,066	0,004
	Somme	1,129
	Perte pour le produit $L_{Produit}$	1,062
	Décision	Refusée

Tableau 39 : Tableau d'évaluation d'un produit comportant plusieurs surfaces

L'acceptation du produit est décidée si la perte totale sur la surface est inférieure à l'unité. Ici, le produit est donc refusé.

On note que la seule présence d'une seule surface dépassant la limite d'acceptation (Tableau 38) conduit au rejet du produit car la perte totale du produit est supérieure à l'unité. En effet, en considérant l'équation de la perte globale sur le produit (Équation 64), on note que si un seul des kx^2 élémentaires est supérieur à l'unité (Tableau 38), alors la perte sur le produit est forcément supérieure à l'unité. Le Tableau 40 donne un exemple.

Surface	Perte de la Surface $L_{Surface}$	Perte ²
S1	1,440	2,074
S2	0,316	0,100
S3	0,460	0,212
	Somme	2,385
	Perte pour le produit $L_{Produit}$	1,544
	Décision	Refusée

Tableau 40 : Tableau d'évaluation d'un produit comportant une surface inacceptable

L'utilisation de la Perte $L_{Produit}$ permet de répondre au problème : P4 - Comment évaluer la qualité d'un produit présentant des anomalies sur plusieurs surfaces ?

2.5 RECAPITULATIF DES DIFFERENTES COMBINAISONS D'ANOMALIE

Au paragraphe 2.1, nous avons posé plusieurs problèmes. Le Tableau 41 récapitule l'ensemble des relations permettant d'évaluer et de juger de la combinaison de plusieurs anomalies sur différentes surfaces afin de traduire la perception qualité du sujet.

	Problèmes	Relations
P1	Comment évaluer la qualité d'une surface ayant une anomalie sur un descripteur ?	$L_{anomalie} = kx_A^2$ et $k = 1/USL^2$ avec x, valeur de l'intensité de l'anomalie dans l'échelle sémantique USL : Limite d'acceptation Supérieure sur le couple Descripteur/Surface considérée
P2	Comment évaluer la qualité d'une surface ayant plusieurs anomalies sur un descripteur ?	$L_{Descripteur} = \sqrt{\sum_{Anomalies} (kx_{Ai}^2)^2}$
P3	Comment évaluer la qualité d'une surface ayant des anomalies selon plusieurs descripteurs ?	$L_{Surface} = \sqrt{\sum_{descripteurs} (L_{Descripteur})^2}$
P4	Comment évaluer la qualité d'une pièce ayant des anomalies sur plusieurs surfaces ?	$L_{Produit} = \sqrt{\sum_{surfaces} (L_{Surface})^2}$
P5	Comment juger de l'acceptation ou du refus d'une pièce ?	$L_{Produit} \leq 1$ pour l'acceptation $L_{Produit} > 1$ pour le refus

Tableau 41 : Récapitulatif du tableau de calcul des différentes combinaisons de la perte

Application

Soit un produit où plusieurs anomalies ont été détectées puis évaluées. Le Tableau 42 récapitule l'ensemble des intensités données à ces anomalies par le contrôleur.

		Intensités					
		1	2	3	4	5	6
ANOMALIES	Marque	Bande de carrure (BC)	Bande de carrure (BC) Dessus corne (DC)				
	Tache			Cran de glace (CG)			
	Particule		Cran de glace (CG)				
	Déformation	Dessus corne (DC)					

Tableau 42 : Bilan des anomalies sur le produit : Intensités/Anomalies/Descripteurs/Surfaces

Nous allons donc dérouler la démarche exposée dans ce chapitre pour définir si le produit doit être accepté ou non. Le Tableau 43 reprend l'ensemble des formules et des applications numériques utilisées pour fournir cette réponse.

Surfaces	Anomalies	USL	K	Perte Anomalie 1	Perte² Anomalie 1	Perte Anomalie 2	Perte² Anomalie 2	Perte Descripteur	Perte² Descripteur	Perte Surface	Perte² Surface	Perte Produit
			$k = 1/USL^2$	$L_{A1} = kx_{A1}^2$	L_{A1}^2	$L_{A2} = kx_{A2}^2$	L_{A2}^2	$L_D = \sqrt{\sum_{Anomalies} (L_{Ai})^2}$	L_D^2	$L_S = \sqrt{\sum_{descripteurs} (L_D)^2}$	L_S^2	$L_P = \sqrt{\sum_{surfaces} (L_S)^2}$
BC	Marque	2,5	0,160	0.160	0.026	0.640	0.410	0,660	0,435	0,660	0,435	1,232
	Tache	2,5	0,160									
	Particule											
	Déformation	2,5	0,160									
DC	Marque	2,5	0,160	0,640	0,410			0,640	0,410	0,660	0,435	
	Tache	2,5	0,160									
	Particule											
	Déformation	2,5	0,160	0,160	0,026			0,160	0,026			
CG	Marque	3,5	0,082							0,804	0,646	
	Tache	3,5	0,082	0,735	0,540			0,735	0,540			
	Particule	3,5	0,082	0,327	0,107			0,327	0,107			
	Déformation	3,5	0,082									

Tableau 43 : Tableau de synthèse pour l'application de l'évaluation du produit

Notons que $L_P > 1$, par conséquent, le produit est refusé.

3 CONCLUSION

Ce chapitre avait pour objectif de définir une évaluation globale d'un produit à partir de l'ensemble des évaluations qu'un sujet est en mesure de réaliser sur chacune des anomalies suivant la démarche détaillée au chapitre 2. La démarche que nous proposons, s'inscrit donc dans cette optique. Elle répond donc à la complexité des mesures réalisées i.e. à l'ensemble des combinaisons pouvant exister lors de l'évaluation. Ces combinaisons apparaissent à la fois dans le cas d'une évaluation d'une seule anomalie (entre le type d'anomalie, l'intensité et la zone) mais aussi dans le cas de plusieurs anomalies sur le même produit.

Notre proposition prend donc en compte cette difficulté. Nous proposons une évaluation globale de la qualité d'un produit pouvant contenir plusieurs anomalies de différentes intensités sur plusieurs surfaces. Aussi, nous avons cherché dans ce chapitre à développer un concept générique basé sur une mesure utilisant le tolérancement inertiel. Liant alors l'évaluation de l'anomalie par l'analyse sensorielle et le jugement final d'acceptation du produit par le tolérancement inertiel, nous pouvons alors nommer notre concept d'évaluation du produit : le *tolérancement inertiel sensoriel*.

L'utilisation de ce tolérancement inertiel sensoriel est donc un outil de prise de décision qui permet à partir des évaluations des anomalies réalisées par le sujet, de décider de l'acceptabilité ou non du produit. Cette décision prend donc en compte chacune de ces anomalies du produit en les différenciant selon leur descripteur, leur intensité et la surface où elle se trouve. Nous avons déjà insisté au chapitre 2, sur le fait que le sujet ne prenait plus la décision d'accepter ou non l'anomalie qu'il avait perçue. Mais ce dernier devait se référer à des niveaux de référence bien définis. Il en va de même dans le cas d'une évaluation globale du produit. L'évaluation de chaque anomalie va alors intervenir dans cette évaluation globale. Aussi en utilisant le principe de combinaison quadratique sur lequel notre proposition de tolérancement inertiel sensoriel se base, la décision finale va pouvoir être donnée.

Grâce à ce tolérancement inertiel sensoriel, le travail que nous venons de décrire répond aussi à notre second objectif : préparer une automatisation de la décision dans un travail de recherche ultérieur. Nous verrons plus précisément de quels travaux il s'agit dans les perspectives de ce mémoire.

Nous voyons alors que l'ensemble des chapitres que nous avons proposés dans ce mémoire est lié par les propositions que nous avons faites. Le chapitre 5 fait donc le bilan entre l'ensemble des chapitres de ce mémoire. Permettant alors de regrouper l'ensemble de nos propositions et de les appliquer à un cas pratique chez Patek Philippe SA, société avec laquelle nous avons collaboré dans le cadre de ces travaux de thèse.

Chapitre 5

Application chez Patek Philippe SA

1 INTRODUCTION

Dans les chapitres précédents, nous avons exposé l'ensemble de nos propositions pour répondre à la problématique du contrôle visuel des produits. Les grands principes associés à ces propositions sont les suivants :

- le contrôle visuel demande deux expertises distinctes : l'exploration et l'évaluation. (chapitre 2)
- l'exploration est facilitée, bien évidemment par la mise en place de conditions extérieures adaptées, mais aussi par un instrument de mesure (l'homme) en adéquation avec la tâche devant être effectuée (chapitre 2)
- l'évaluation est facilitée par l'utilisation d'une démarche utilisée en analyse sensorielle. (chapitre 2)
- la maîtrise des deux expertises est très importante pour limiter la variabilité des résultats, d'où la proposition d'une métrologie sensorielle (chapitre 3)
- cette maîtrise est également très importante pour détecter toute dérive, d'où la création d'un nouveau test $R^2 \& E^2$ (chapitre 3)
- l'association de toutes les explorations et des évaluations de l'ensemble des anomalies permet d'obtenir une décision finale sur le produit global (chapitre 4).

L'ensemble de ces propositions a été appliqué dans l'entreprise Patek Philippe. L'objectif de ce chapitre n'est pas de présenter l'ensemble des résultats que nous avons obtenus lors de cette application puisque ceux-ci ont été présentés tout au long du mémoire. Ce chapitre montre plutôt la manière dont ces propositions ont pu être déployées et adaptées dans l'entreprise Patek Philippe.

Dans un premier temps, nous présenterons quels étaient les enjeux de l'entreprise concernant le contrôle qualité visuel. Nous détaillerons en particulier les difficultés que rencontrait l'entreprise il y a trois ans au début de notre travail. Nous décrirons également les conséquences de ces difficultés. .

Nous montrerons ensuite que la création de standards est un des moyens pour palier ces difficultés en garantissant la mesure et l'instrument de mesure.

Nous expliquerons ensuite la nécessité de collecter l'ensemble des informations en provenance des contrôles pour, d'une part, être en situation de disposer d'une assistance à la décision et, d'autre part, pour faire du traitement statistique sur ces données.

Nous verrons également la mise en place de l'organisation métrologique sensorielle dans l'entreprise.

Enfin, nous tirerons un bilan de l'application que nous avons réalisée. Nous montrerons plus spécifiquement les changements culturels qui se sont produits tant au niveau des contrôleurs qu'à un niveau plus global dans l'entreprise.

2 LES ENJEUX DE L'APPLICATION D'UNE NOUVELLE APPROCHE DANS LE CONTROLE VISUEL

Afin d'obtenir une qualité exceptionnelle et irréprochable, Patek Philippe vise un niveau qualité pour ses produits qui dépasse très largement celui de la simple recherche de réduction de non conformités. L'enjeu est en effet pour l'entreprise celui d'atteindre un niveau de qualité devant être assimilé par ses clients à un niveau proche de la perfection. La recherche de cette qualité ne se limite donc pas à fabriquer des montres qui soient techniquement hors du commun et fonctionnellement exemplaires, mais elle inclut également celle de devoir fabriquer des montres qui soient esthétiquement irréprochables. Pour ces trois aspects d'un produit, technique, fonctionnel et visuel, il est possible de réaliser deux types de contrôle : l'un sur le fonctionnel basé sur une approche dimensionnelle et l'autre sur le visuel basé sur une approche sensorielle. Ces deux contrôles constituent actuellement, à poids égal, les deux composantes d'un contrôle qualité réalisé sur des produits fabriqués ou en cours de fabrication.

Ces contrôles visuels posent cependant de nombreux problèmes à l'entreprise, résultant pour l'essentiel de la très grande variabilité des résultats obtenus.

2.1 LES DIFFICULTES RELEVÉES DANS L'ENTREPRISE

2.1.1 LES NOTIONS UTILISÉES

Lorsque nous parlons de difficultés relevées dans l'entreprise, nous ne pouvons pas nous empêcher de penser à certains concepts qui à l'heure actuelle font partie des nouvelles stratégies d'entreprise. Ces concepts font partie de la culture d'entreprise et apparaissent dans les normes [ISO 9001, 2001] et [ISO 9001, 1994].

La grande différence entre ces deux normes est incontestablement la notion d'*Amélioration en continue* beaucoup plus présente dans la nouvelle norme et bien évidemment de plus en plus présente dans la culture d'entreprise. La nouvelle version 2008 amplifie encore cette démarche d'*Amélioration Continue* qui repose sur des petites améliorations de performance réalisées au quotidien et de manière permanente. Cette démarche graduelle vient s'associer à un autre principe de la qualité, aujourd'hui indispensable, qui est celui de réaliser également des améliorations radicales de performance.

Deming reprend clairement cette notion : *"Commençons par améliorer ce que nous savons faire, mais pas encore assez bien. Ensuite nous innoverons. Mais pas l'inverse"*. La bonne mise en œuvre de ce principe passe notamment par :

- une réorientation de la culture de l'entreprise,
- la mise en place d'outils et concepts comme la roue de Deming (cycle PDCA vu au chapitre 1), un système de suggestion efficace et le travail en groupe,
- une standardisation des processus,
- un programme de motivation (système de récompense, satisfaction du personnel...),
- une implication active du management pour le déploiement de la politique.

Beaucoup de démarches d'amélioration ont été créées afin de faciliter et d'aider les entreprises à répondre à leur problématique d'amélioration alliant qualité, coût et délai. Les approches modernes de la performance industrielle ont ainsi montré l'importance des notions que nous venons d'exposer. Prenant en considération ces démarches et ces principes, nous détaillons maintenant les résultats des premiers audits que nous avons effectués dans l'entreprise Patek Philippe.

2.1.2 LES RESULTATS DES PREMIERS AUDITS

Les premiers audits réalisés dans l'entreprise Patek Philippe ont permis de relever certaines difficultés, la principale d'entre elles relevant du manque de standard dans l'entreprise. Nous reviendrons sur cette difficulté et ses conséquences dans le paragraphe 2.2.

Ces premiers audits ont été réalisés avec l'objectif de mieux comprendre les difficultés rencontrées par l'entreprise lors de ses contrôles qualité. Ils ont donc été menés au cœur de la production. Il a été ainsi demandé à quelques personnes concernées par l'esthétisme des produits de se prêter à des tests.

Pour quantifier la variabilité des résultats du contrôle visuel et selon l'habitude des opérateurs de répondre *Conforme* ou *Non Conforme* lors de leurs contrôles, nous avons donc d'abord réalisé un test R&R (Répétabilité et Reproductibilité). Nous résumons ici les conditions de déroulement de ce test et les résultats obtenus à l'issue de ce test.

Trois opérateurs, choisis aléatoirement parmi ceux affectés à la fabrication des produits ou à leur contrôle, ont évalué 30 produits en précisant si ceux-ci étaient conformes (C) ou non (NC), Sans qu'ils le sachent, ils ont ensuite réévalués ces mêmes produits. La Figure 66 montre les différentes zones où ces évaluations ont été réalisées.

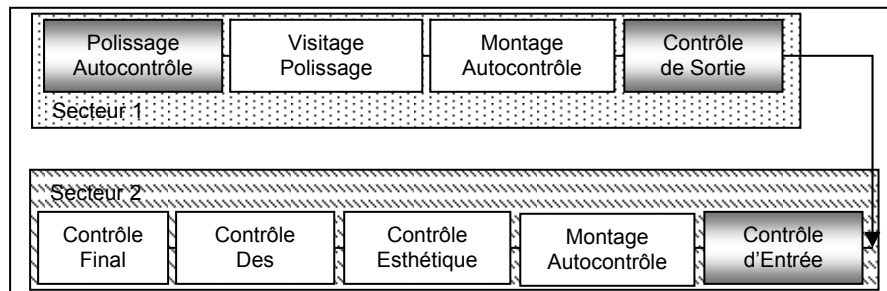


Figure 66 : Cycle de la réalisation des pièces

Le Tableau 44 montre les résultats obtenus par ce test.

Numéro de Pièce	Opérateur 1		Opérateur 2		Opérateur 3	
	1	2	1	2	1	2
1	C	C	NC	NC	NC	NC
2	C	NC	NC	C	C	C
3	C	NC	C	NC	C	NC
4	C	NC	C	C	C	C
5	C	NC	NC	NC	NC	C
6	C	NC	C	C	NC	C
7	C	C	C	NC	C	NC
8	C	C	NC	NC	C	C
9	C	NC	C	C	NC	C
10	C	C	NC	C	C	C
11	C	C	C	C	NC	C
12	NC	NC	C	C	NC	C
13	C	C	C	C	C	C
14	C	C	NC	NC	C	C
15	NC	NC	C	C	C	C
16	C	C	NC	NC	C	C
17	NC	NC	NC	C	C	C
18	C	C	C	C	C	C
19	NC	NC	NC	NC	C	C
20	NC	NC	C	NC	NC	NC
21	C	NC	NC	NC	NC	C
22	C	C	C	C	C	C
23	NC	NC	C	C	C	C
24	C	C	C	C	NC	C
25	C	C	NC	NC	NC	C
26	C	NC	C	C	NC	C
27	C	C	NC	NC	NC	C
28	C	NC	NC	NC	C	C
29	NC	NC	C	C	C	C
30	NC	NC	C	C	C	NC

* C: Conforme – NC: Non Conforme

Tableau 44: Résultat du test R&R

La répétabilité, c'est-à-dire la capacité d'un opérateur à produire le même résultat après deux évaluations successives d'un même produit, était nettement insuffisante. Pour l'opérateur 3 par exemple, 13 des 30 mesures effectuées ont abouti à deux décisions contradictoires à l'issue des deux évaluations.

La reproductibilité, c'est-à-dire la capacité de plusieurs opérateurs à aboutir au même résultat après l'évaluation d'un même produit, est également médiocre. Par exemple, la pièce 6 a été évaluée successivement *Conforme* puis *Non-conforme* par l'opérateur 1, et *Conforme* puis *Conforme* par l'opérateur 2.

Qu'ils soient en situation d'auto contrôle ou dédiés au contrôle visuel, les opérateurs ne partagent donc pas la même interprétation de la conformité d'un produit. Cette variabilité a évidemment plusieurs conséquences pour l'entreprise dont celle, très coûteuse, de générer des retouches inutiles (ces retouches pouvant elles-mêmes dans certains cas être à l'origine de l'apparition de nouvelles anomalies).

Ces résultats ont donc montré que les opérateurs ne partageaient pas la même vision de la conformité des produits, et ceci alors qu'ils étaient convaincus du contraire. Le standard était effectivement parfois mal adapté, peu formalisé, voire quasi inexistant dans certains cas.

2.2 LES CONSEQUENCES

Suite à cet audit, nous avons identifié les facteurs pouvant expliquer la variabilité des résultats obtenus.

✖ *La dérive de l'apprentissage*

A la date de l'audit, les connaissances capitalisées par l'entreprise dans le domaine du contrôle visuel le sont à partir d'une transmission principalement orale. Chaque nouvel opérateur, en charge d'un contrôle visuel, est en effet formé par un opérateur plus expérimenté qui lui transmet de façon orale son savoir-faire (techniques de contrôle des produits, mécanismes d'évaluation de la conformité, etc.). Le message transmis englobe bien sûr de l'information, mais il englobe également une part plus ou moins importante de subjectivité que le récepteur ne parvient pas toujours à clairement distinguer. Cette difficulté est généralement le résultat des transformations successives que l'information utile portée par ce message subit à différentes étapes de sa transmission, depuis sa sélection par l'émetteur jusqu'à son appropriation par le récepteur. Ces transformations expliquent une partie des écarts de contrôle relevés d'un opérateur à l'autre.

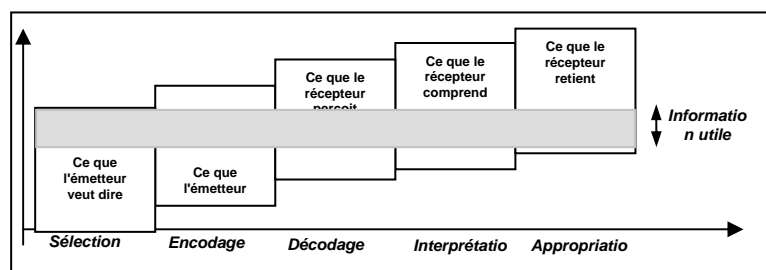


Figure 67 : Contrôle visuel : les étapes de transmission de l'information

A ce problème de la transmission de l'information s'ajoute également celui de son expression. L'émetteur et le récepteur de l'information ne partagent en effet pas toujours le même vocabulaire et/ou ne donnent pas nécessairement le même sens aux termes utilisés pour exprimer cette information. [Rousseau, 2002] [Sangsue et al., 2005] [Villarino et al., 2007] Dans l'entreprise, cela se traduit effectivement par l'utilisation simultanée de plusieurs grilles d'anomalies, utilisées à différents stades du contrôle visuel, et se référant pourtant à des anomalies parfois identiques sur les produits.

✖ *Un vocabulaire flou*

Ces grilles d'anomalies, parfois redondantes, posaient également d'autres problèmes. Si elles avaient en commun de permettre à un opérateur de nommer l'anomalie, certaines d'entre elles donnaient également la possibilité d'exprimer d'autres d'informations comme, par exemple, la cause de cette anomalie, sa localisation, ou encore ses conséquences à attendre sur le produit. Le manque de cohérence dans la manière d'utiliser ces grilles suffit déjà à expliquer une grande part de la variabilité générée à différents stades du contrôle visuel.

Code	Liste de la table Défauts Réception Matières	Numéro
A	Dimen. Fonction Usi. Diamant. Etat surface, filet, etc	1
B	Blessures, fentes, coups, raies, fraies	2
C	Termin./polis./avivage, sablage, satinage, perlage, tube etc	3
D	Bavures/dentelles, cran, réhaut, bords coupants, arrête vive	4
E	Colle ou joint déborde, bulle, poil, point noir/cran, poussière	5
F	Assembl. Sertis. F. tenue gl. Fd, crochem. Soud. Ajust. Nanof.	6
G	Rhodiage, tâches, flammes, couleur, adhérence	7
H	Etamp. Doublure, rejet, déform. Défaut mat. Porosité, paille	8
I	Dureté, recuit, peau d'orange	9
J	Etanchéité, boîtes, couron., poussoirs, correct.tube etc	10
K	Inclusion, bulles, points noirs ou blancs, voile	11
L	Saphir ou pierres précieuses égris., vibrat., piquûres, ondulat.	12
M	Métallisation, couleur, régularité, adhérence	13
N	Divers, réglage, propreté, manipulation, conditionnement	14
O	Ø hauteur de chasse, dépoli, angles sous brosse, sus poli	15
P	Moulage, traces d'éjecteurs, retassure, grainage etc	16
Q	N° consécutif, gravages, poinçons C.M.P, titre	17

Tableau 45 : Exemple d'une table des anomalies

Notons également que ces grilles ne permettaient pas en l'état de préciser l'intensité de l'anomalie. Elles ne permettaient donc pas à l'opérateur de justifier la décision prise concernant la conformité ou la non-conformité d'un produit. Difficile dans ces conditions de parvenir à une application cohérente des règles à utiliser pour évaluer la conformité des produits lors d'un contrôle.

✱ *La lassitude des contrôles*

A ces problèmes liés directement à l'utilisation et l'interprétation de ces grilles se greffaient d'autres problèmes liés cette fois aux contrôles même effectués par les opérateurs. Le problème le plus souvent évoqué était le résultat direct de la récurrence de certains contrôles, les résultats pouvant varier significativement selon, par exemple, que ce contrôle était réalisé par l'opérateur à sa prise de poste ou en fin de poste.

Enfin, cette variabilité s'expliquait également par l'obligation pour chaque opérateur de devoir se réétalonner en permanence, en fonction de l'évolution des critères qualité à observer sur les produits ou en fonction de l'évolution même de ces produits.

✱ *Une cible imprécise*

A ces modifications de critères venait s'ajouter un manque de cohérence sur la cible à atteindre. En effet, personne ne savait réellement les critères qualité que devaient respecter les produits pour répondre au niveau qualité Patek Philippe. Tout le monde voulant s'impliquer dans cette recherche de perfection qualité, chacun pensait savoir à son niveau ce qu'était "*la qualité Patek*". Certes, si le savoir faire compte beaucoup dans le métier d'horloger, l'absence de critères clairs et formalisés ne permet pas à un opérateur de connaître réellement la cible à viser.

Notons également que ce manque de référence clairement exprimé va aussi engendrer un problème systématique dans la détection des dérives sur le niveau de référence à satisfaire. Car sans réelle cible, comment arriver à voir une dérive lors du contrôle visuel ?

Nous avons pu voir que le manque de standards engendrait de nombreuses discussions sur les anomalies qui étaient détectées par les différents acteurs en situation de contrôle ou d'autocontrôle. Ces discussions étaient à l'origine de beaucoup de tensions dans l'entreprise entre les différents ateliers. Mais, plus grave encore, ces discussions ne permettaient pas

d'aboutir à la définition de la cible qualité à viser, et donc d'une référence à utiliser lors des différents contrôles.

Ce manque de standard était également à l'origine de nombreuses retouches réalisées sur les produits. Par manque de référence en effet, chaque contrôleur ou opérateur se référait uniquement à sa propre expertise et à son propre jugement ce qui occasionnait un nombre considérable de retouches, soit par excès de zèle, soit par peur de mal faire. Ces retouches superflues généraient des coûts non négligeables incluant les coûts des retouches elles-mêmes mais aussi d'autres coûts comme ceux relevant des allongements de délais.

L'enjeu de notre travail a donc été de créer des standards pour le contrôle visuel dans l'entreprise, et ceci afin de palier les difficultés énumérées ci-dessus.

3 LA CREATION D'UN STANDARD POUR LE CONTROLE VISUEL

Notre travail a donc consisté à proposer des standards dans l'entreprise Patek Philippe de manière à mieux utiliser les moyens de mesure et fiabiliser ainsi les mesures relevées lors des contrôles visuels. Ce paragraphe décrit la démarche que nous avons utilisée pour y parvenir..

3.1 LA DEMARCHE RETENUE

3.1.1 UN PROJET PILOTE

Afin d'appliquer la démarche que nous avons conçue et développée dans les chapitres précédents, nous avons choisi de réaliser notre application pilote sur les boîtes de montre.

✱ *Qu'est ce qu'une boîte de montre ?*

Il s'agit de l'enveloppe de la montre à l'intérieur de laquelle se trouvera, lorsque la montre sera totalement assemblée, le mécanisme et le cadran pour lire l'heure. La Figure 68 illustre donc, sous une forme simplifiée, une boîte de montre.

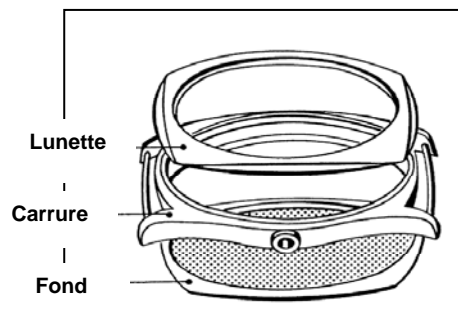


Figure 68 : Exemple de définition de zones

Une boîte de montre peut être composée de plusieurs zones variables qui dépendent de la référence ou du modèle proposé. Dans l'exemple de la Figure 68, la boîte est composée de trois zones : la lunette, la carrure et le fond. Cependant chacune de ces zones peut elle-même être décomposée en sous zones. Par exemple, la carrure peut être décomposée en bande de carrure, cornes et dessus de carrure.

✱ *Justification du choix*

Le choix s'est porté sur la boîte de montre pour plusieurs raisons.

D'abord, il s'agit d'un produit avec des dimensions à l'échelle du centimètre ce qui, dans le cadre où cette thèse a été réalisée, est rare. L'échelle horlogère est en effet plutôt de l'ordre du micromètre. Il nous était donc plus aisé de commencer par un produit de ce type.

La boîte de montre regroupe plusieurs zones, visibles ou non visibles selon les cas lorsque la montre est au poignet du client. Ces zones seront soumises à différents niveaux de référence. Il sera nécessaire de les prendre en compte lors de leur mise au point avec les experts.

L'une des particularités d'une boîte de montre est qu'elle fait intervenir plusieurs procédés de mise en forme et de fabrication selon les modèles : polissage, satinage, diamantage, etc. Nous avons donc à prendre en compte cette particularité.

La diversité des supports de l'anomalie dépend certes du procédé de mise en forme et de fabrication mais il peut aussi dépendre du choix même du matériau. En effet, les difficultés rencontrées lors de la fabrication peuvent provenir de la dureté, de la matière L'or ou le platine ne se travaille de la même manière et chacun à sa propre difficulté de modelage. Par exemple, le platine lors de son usinage laisse paraître des porosités qui dépendent entièrement de la matière.

Il nous fallait également prendre en compte la forme de la boîte de montre, plus ou moins complexe selon les modèles (Annexe 1).

3.1.2 LA STRUCTURATION DU PROJET

Nous avons donc utilisé la boîte de montre pour appliquer l'approche théorique que nous avons développée :

- réduction des difficultés de la perception des anomalies et donc maîtriser l'exploration du produit (chapitre 2)
- décision d'acceptation ou de refus suivant des critères non variables (chapitre 2)
- détection, mesure et limite à toute dérive de la démarche et du système mis en place (chapitre 3)
- maîtrise de l'évaluation des anomalies et donc du produit global mais aussi la variabilité en fonction de l'instrument de mesure utilisé (chapitre 4)

Les résultats de cette application ont été détaillés tout au long de ce mémoire. L'objectif de la partie suivante n'est donc pas de détailler à nouveau ces résultats mais de décrire les modifications culturelles et structurelles dans l'entreprise qu'a permis d'initier cette application.

3.2 LES ETAPES SUIVIES

Bien sûr, nous avons donc cherché à travailler sur les deux expertises composant le contrôle visuel : l'exploration et l'évaluation. Puis, nous avons travaillé sur le jugement final d'acceptabilité ou de refus de l'anomalie (Figure 69), de la surface, puis du produit global.

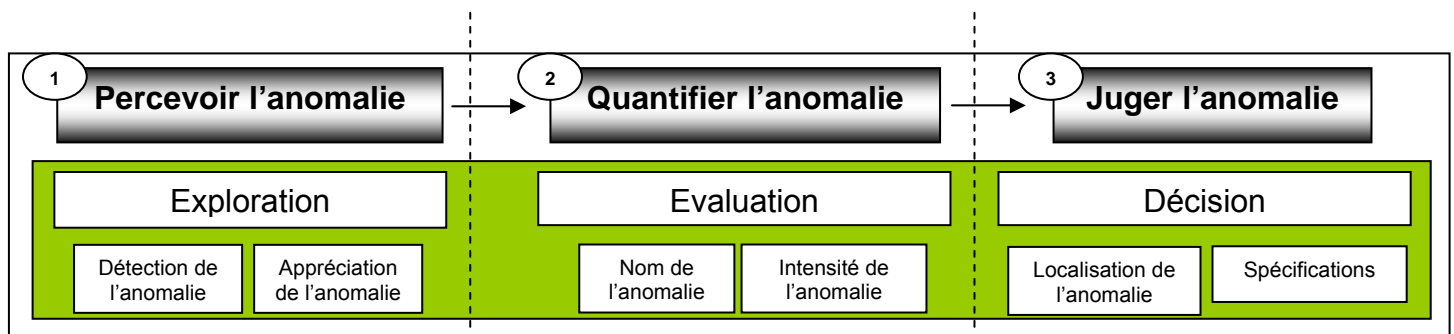


Figure 69 : 3 étapes = 2 expertises différentes lors d'un contrôle + 1 décision

3.2.1 PREMIERE ETAPE : L'EXPLORATION ET SES APPORTS

Cette première étape a porté sur l'exploration de l'anomalie en travaillant sur la réduction de la variabilité sur l'ensemble des 5M.

Dans le chapitre 2, nous avons insisté sur la difficulté de percevoir la totalité des anomalies de la pièce. Cette étape est assez fastidieuse et donc crée énormément de variation dans les résultats obtenus lors de l'exploration du produit.

Nous avons répondu à ce constat par une approche basée sur les 5M afin de rechercher les causes de cette variabilité et d'en tester les facteurs pouvant alors être influents.

A partir de cela, nous avons pu réaliser plusieurs modifications au sein de Patek Philippe sur les facteurs détectés comme étant les plus influents dans la perception des anomalies. Ces changements ont alors apporté une nouvelle vision des choses vis-à-vis de plusieurs éléments que nous développons maintenant.

Autrefois considéré comme une tâche très ingrate, le contrôle doit être vu comme une réelle expertise. Lors de son affectation, le contrôleur doit avoir des prédispositions à effectuer des contrôles et une qualification qui le rend expert de son métier. Nos travaux ont donc permis de valoriser cette tâche et donc ainsi de valoriser le métier de contrôleur dans l'entreprise Patek Philippe.

Cependant, devant cette modification de statut du contrôleur, il est normal de modifier, lorsque c'est nécessaire, l'ensemble des facteurs le concernant.

Au niveau de l'acuité visuelle, une sensibilisation a été réalisée pour que l'ensemble des contrôleurs prenne conscience de la nécessité d'avoir une acuité visuelle suffisante pour réaliser la tâche demandée. Cette prise de conscience, en accord avec d'autres actions menées au sein de Patek Philippe, a été collective. Cela a même été plus loin qu'un simple contrôle visuel de l'ensemble des contrôleurs. Nous avons montré que pour réaliser une tâche aussi minutieuse, il était nécessaire de prendre en considération différents éléments pouvant rentrer en interaction. [Liévin, 1993] En fait, réalisant une tâche bien précise, le contrôleur est soumis à son environnement de travail. Il faut donc juger de l'acuité visuelle du contrôleur, non pas à partir d'un simple test de lecture comme le ferait un ophtalmologue, mais en condition réelle d'utilisation. L'acuité visuelle de chacun doit donc être testée sous un éclairage donné, sur un poste de travail type, suivant la fatigue ou le stress de la journée. Tous ces éléments, modifiant l'acuité visuelle du contrôleur, peuvent permettre à Patek Philippe de gagner en efficacité, valorisant alors la perception de l'anomalie.

A cette acuité visuelle et en considérant toujours le statut du contrôleur, il vient s'ajouter les effets certes bénéfiques mais pouvant être aussi pervers de la loupe représentant une aide pour la détection des anomalies. Le contrôleur est donc habitué à utiliser une loupe d'un grossissement bien défini suivant la tâche qu'il réalise afin de percevoir les anomalies sur le produit. Cependant, la réflexion menée a suscité le doute face à cette affirmation qui avec le recul peut être qualifiée de non fondée. En effet, la loupe était associée à la tâche, mais ne faut-il pas plutôt l'associer au contrôleur ? Cet outil rentre entièrement en interaction entre l'acuité visuelle du contrôleur, la luminosité... C'est pourquoi nous pouvons nous demander si il ne faudrait pas donner un grossissement de loupe en adéquation avec l'acuité visuelle du contrôleur ? La nouvelle mentalité face à cette question serait alors de choisir judicieusement un grossissement pour permettre un lissage de tous les niveaux visuels.

Le contrôleur évolue donc dans un environnement de travail qui n'a pas réellement été standardisé au sein de l'ensemble des ateliers de contrôle de l'entreprise. Nous pouvons donner l'exemple des supports de couleur montrés comme très importants dans le plan d'expériences développé au chapitre 2. Ces supports placés sur les plans de travail étaient de différentes couleurs selon les ateliers pourtant chargés de réaliser des contrôles sur les mêmes produits. Ces supports n'étaient pourtant pas figés. Cette prise de conscience a été

nécessaire car pourquoi utiliser des couleurs de supports différents pour le contrôle d'un même produit ?

Le travail effectué sur l'environnement de travail et sur le contrôleur en lui-même a donc abouti à une procédure de contrôle formelle décrivant étape par étape les zones du produit à contrôler. Facteur influent détecté lors du plan d'expérience, sa réalisation sur le projet pilote a donc été menée et son bénéfice largement ressenti. Cette procédure faisant figure de standard pour le contrôle des boîtes de montre a permis de figer l'ensemble des réflexions et des décisions prises (Figure 70).

2. Procédure de visitage d'une boîte			
Prendre la boîte dans les mains en respectant toutes les précautions de manipulation définies auparavant			
Il°	Description de l'opération	Outils	Remarques/Observations
1	Observer de manière générale la boîte	Oeil	Ceci pour observer différents éléments : document, n° consécutif, plan de joint, la couleur de tous les composants, la symétrie des cornes...
Contrôler le dessous de la boîte			
2	le fond (plein ou saphir)	Oeil	En cas de fond satiné faire attention à son homogénéité
3	Les dessous des cornes	Oeil	
4	Présence des poinçons	Oeil	
5	L'intérieur corne	Oeil	
En cas de fond saphir			
6	Le cran de glace	Loupe 2,5	
7	La glace	Loupe 2,5	
Contrôler les côtés de la boîte			
8	La bande de carrure	Loupe 2,5	
9	La couronne	Loupe 2,5	Vérifier le fonctionnement
10	Les poussoirs	Loupe 2,5	Vérifier le fonctionnement
11	Les correcteurs	Loupe 2,5	Vérifier le fonctionnement
12	L'extérieur corne	Loupe 2,5	
13	L'entre corne	Loupe 2,5	
Contrôler le dessus de la boîte			
14	Le cran de glace du dessus	Loupe 2,5	
15	La glace	Loupe 2,5	Chassage à plat, antireflet, réhaut, composants à l'intérieur
16	La lunette	Loupe 2,5	Vérifier l'alignement du satinage
17	La carrure	Loupe 2,5	
18	Les dessus de corne	Loupe 2,5	
19	Faire une vue d'ensemble de la boîte : dessus, cotés et dessous	Oeil	
20	Mettre la pièce dans la protection qui lui est adaptée et dans son plateau		

Figure 70 : Extrait de la procédure de contrôle pour les boîtes de montre

3.2.2 DEUXIEME ETAPE : L'ÉVALUATION, UTILISATION ET APPORTS DE LA DEMARCHE

Cette deuxième étape a porté sur l'évaluation de l'anomalie en travaillant sur la création de la grille d'intensité, principal outil pour valoriser cette expertise.

Toujours dans le chapitre 2, nous avons décrit la démarche pour évaluer les anomalies. Cette démarche, construite sur une démarche utilisée en analyse sensorielle, est composée de 4 étapes : *Préparation, Construction, Validation, Utilisation*. Cette dernière phase, que

nous n'avons pas développée dans le chapitre 2, va donc être l'aboutissement des travaux effectués dans les phases précédentes. Elle va donc permettre à la démarche auparavant à l'état de projet de se concrétiser dans un contexte productif tel que la mise en place de la méthode au sein des contrôles visuels effectués en production.

3.2.2.1 UTILISATION DE LA DEMARCHE

La démarche comporte alors plusieurs standards, tous capitaux pour pouvoir atteindre l'objectif final du contrôle : donner un jugement.

Les standards référencés sont donc :

- la liste des descripteurs de l'anomalie prédéfinis
- la grille d'intensité
- la liste des zones de l'anomalie prédéfinies
- la table des niveaux de référence

Ces quatre standards vont donc permettre de juger l'anomalie comme le montre la Figure 71.

Par exemple, sur cette Figure 71, l'utilisateur a relevé une anomalie. Il a sélectionné durant l'expertise d'évaluation de l'anomalie qu'il s'agissait d'une *Marque*, d'intensité 2. Or, l'étape suivante est alors de juger l'anomalie. Le contrôleur définit cette anomalie comme se trouvant sur la *Lunette*. Or en se référant à la table des niveaux de référence, le contrôleur qui a évalué la gravité de l'anomalie, va pouvoir juger de l'acceptabilité ou non de cette dernière. Dans notre exemple, l'anomalie est donc acceptable car inférieure à 3.

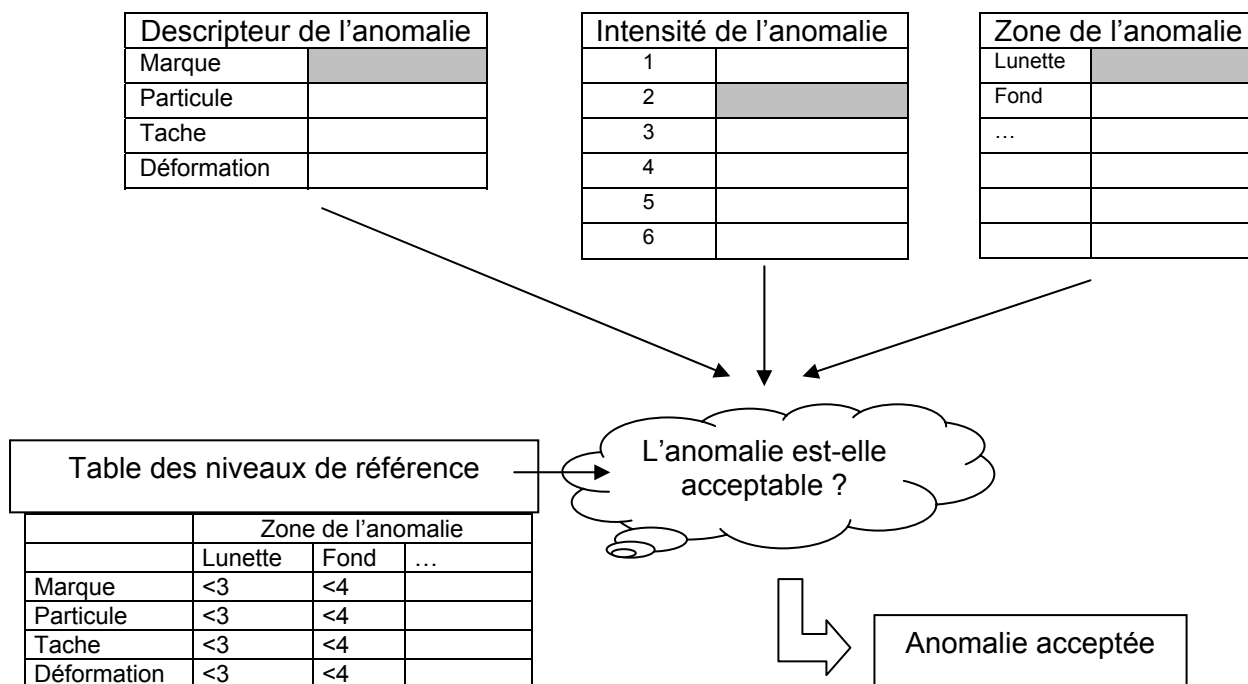


Figure 71 : Evaluation et Jugement de l'anomalie

Ces modifications au sein de Patek Philippe ont pu être réalisées pas à pas et appliquées malgré les difficultés liées aux conséquences engendrées par l'ensemble des acteurs face aux changements. Néanmoins, après ces difficultés (elles seront développées au paragraphe 4.1), ces changements ont alors apporté une nouvelle culture vis-à-vis du contrôle que nous allons développer maintenant.

3.2.2.2 LES APPORTS DE LA DEMARCHE

Comme nous l'avons déjà vu pour l'expertise d'exploration, le rôle et le statut du contrôleur vont aussi évoluer pour l'expertise d'évaluation. L'évaluation devenant une véritable

expertise, il va être demandé au contrôleur de devenir par conséquent un expert de sa tâche. Son profil est alors complètement modifié et son travail valorisé.

Outre cette valorisation de l'expertise, la démarche que nous proposons symbolise une véritable modification de la culture du contrôle.

En effet, avant l'application de cette démarche dans l'entreprise, les contrôles étaient effectués suivant une approche non formalisée et donc peu fiable. Bien sûr basée sur l'expérience de chaque contrôleur, les résultats obtenus au contrôle respectaient le niveau qualité souhaité et revendiqué par l'entreprise. Cependant, ce niveau était atteint suite à la multiplication des contrôles et après de longues et interminables discussions.

Aujourd'hui, cette formalisation de l'évaluation des anomalies par différents standards et par une demande d'expertise plus importante permet une véritable fiabilité dans les résultats aux contrôles.

Au départ, l'utilisation de ces standards fut perçue comme une contrainte. Cependant, les contrôleurs ont petit à petit compris tous les bénéfices que cela apportait en utilisant ses derniers.

La démarche que nous proposons, a donc totalement transformé le contrôle. En effet, autrefois la réponse finale demandée aux contrôleurs étaient "*Conforme*" ou "*Non conforme*" sans l'apport d'aucun justificatif et se rattachant à aucune règle de décision permettant cette justification. Notre démarche a donc été un réel bouleversement dans la manière d'effectuer un contrôle. Imposant une démarche à suivre pas à pas, la décision finale sera donc donnée par des règles de décision et donc d'acceptabilité. Le contrôleur sera donc un expert à la fois en exploration mais aussi en évaluation. La décision finale se retrouve alors justifiée par l'application des standards proposés et utilisés pour effectuer l'évaluation.

Ce bouleversement est donc une nouvelle approche du contrôle et modifie donc la culture du contrôle dans l'entreprise. Le contrôleur n'est plus responsable de la décision finale de l'acceptabilité de l'anomalie mais est devenu responsable de sa justification. Cette nuance peut paraître infime mais après réflexion, cette responsabilité est plus importante que seule la responsabilité de la réponse finale. En effet, chaque utilisation de standard entraîne une responsabilité prise par le contrôleur. Ce dernier en utilisant la démarche se retrouvera en train de justifier la totalité de ces choix (Tableau 46).

Standards utilisés	Justifications
liste des descripteurs	Type de l'anomalie
grille d'intensité	Intensité de l'anomalie
liste des zones	Zone de l'anomalie

Tableau 46 : Justification des choix du contrôleur en fonction des standards à utiliser

Nous ne pouvons donc que constater de réels apports pour l'entreprise en ce qui concerne les différents éléments que nous avons présentés précédemment.

Cependant, il faut noter que cet engouement ne s'arrête pas là. Cette démarche apporte aussi une véritable uniformisation du contrôle pour l'ensemble des acteurs concernés pour cette tâche. Tous les ateliers vont alors suivre une et même méthode sur l'ensemble de la société. Ce nouvel esprit permet une cohésion entre tous les ateliers et un dialogue basé sur le même langage. Cette démarche inculque donc la nouvelle culture du contrôle : tout le monde utilise les mêmes outils pour formaliser son contrôle. C'est pourquoi, et c'est l'une des forces de ce système d'évaluation, chaque descripteur sera identique dans ses caractéristiques sur la grille d'intensité et ce quelque soit les composants ou la pièce contrôlées. Ce point va alors renforcer l'apport que nous venons de citer : l'uniformisation du contrôle.

4 LA REALISATION D'UN OUTIL D'AIDE A LA DECISION

La démarche proposée permet alors de "savoir" contrôler. En effet, nous avons créé les standards nécessaires pour accomplir cette tâche et développé l'expertise pour contrôler une anomalie.

Nous verrons alors qu'il est utile de saisir ces informations pour avoir d'une part une assistance à la décision et d'autre part être capable de faire du traitement statistique sur ces données. Le but est alors de regrouper au maximum les informations et de faciliter leur utilisation. Pour ce faire, nous verrons que nous avons réalisé un outil d'aide à la décision.

4.1 LES DIFFICULTES DE MISE EN PLACE DE LA DEMARCHE

Malgré les apports de la démarche que nous avons essayés de lister dans les paragraphes précédents, il faut reconnaître que dans le contexte de leur mise en place en production cela a suscité quelques difficultés que nous allons exposer maintenant.

Tout d'abord, chaque modification dans l'organisation du travail engendre une résistance au changement. Cette résistance aux changements apparaît dans la majorité des cas par un refus de suivre les nouvelles indications et procédures de travail. Chacun pensant que sa manière de travailler est la meilleure et par conséquent ne voulant pas changer ses habitudes de travail, les décisions et modifications décidées ne sont pas suivies par l'ensemble des personnes concernées. Dans notre cas, la plus grosse difficulté fut de demander aux sujets de suivre la procédure de contrôle développée par les experts afin d'augmenter les possibilités de détection des anomalies d'un produit. Nous avons alors constaté la réticence des personnes vis-à-vis de cette procédure et par conséquent dans certains cas, le non respect de cette dernière.

Cette procédure de contrôle ainsi que les divers standards créés pour améliorer l'expertise d'exploration et l'expertise d'évaluation permettent alors une formation des sujets plus stricte que précédemment. La formation est donc plus structurée qu'avant la création de ces documents – nous rappelons qu'il s'agissait d'une formation purement orale et suivant le savoir faire d'une personne habituée à faire du contrôle visuel. Cependant et malgré notre modification du plan de formation, la formation reste encore en partie tâtonnante car comment vérifier la bonne utilisation des standards, comment s'apercevoir d'une dérive des contrôleurs consciemment ou pas...

Ces deux points sont entre autres des conséquences de la dernière difficulté que nous allons développer : la traçabilité. En effet, dans notre démarche d'amélioration de l'exploration et même de l'évaluation, les produits sont contrôlés mais aucune traçabilité des produits n'est effectuée. Les produits sont rejetés car non conformes aux spécifications i.e. à la table des niveaux de référence. Ils sont simplement définis comme tel mais dans aucun cas, il n'est véritablement indiqué les causes précises de ce rejet. Les résultats des contrôles sont donc saisis de manière très succincte. Aussi, il paraît dans ce cas là très laborieux de mettre en place des indicateurs de performance sur différents points (contrôleurs, référence du produit, temps de contrôle...) mais aussi des actions préventives et correctives.

4.2 UNE SOLUTION : UNE INTERFACE DE SAISIE

Aussi, pour répondre aux difficultés que nous avons décrites dans le paragraphe précédent, nous avons mis en place une interface de saisie. Cette interface permet alors d'une part une formation plus rigoureuse dans le contrôle des produits mais aussi un suivi des contrôles aussi bien vis-à-vis des utilisateurs que des produits. Cette interface peut alors être considérée comme un outil d'aide à la décision. Le concept est simple : à partir des données

que le contrôleur va saisir, cet outil donnera la décision finale : "Conforme" ou "Non conforme". Il représente une assistance à la décision mais aussi un outil d'analyse à partir des données entrées par le contrôleur.

✖ *Cahier des charges*

Les données d'entrée à la réalisation de l'interface pour notre cas d'étude sur la boîte de montre sont donc :

- 4 descripteurs d'anomalie
- La grille d'intensité permettant de qualifier la gravité des anomalies
- Les zones de localisation des anomalies
- Les niveaux d'acceptation des anomalies en fonction de sa zone, de son intensité et de sa catégorie. (i.e. la table des niveaux de référence)

Voici l'analyse fonctionnelle réalisée en phase d'utilisation pour la construction de l'interface. (Figure 72)

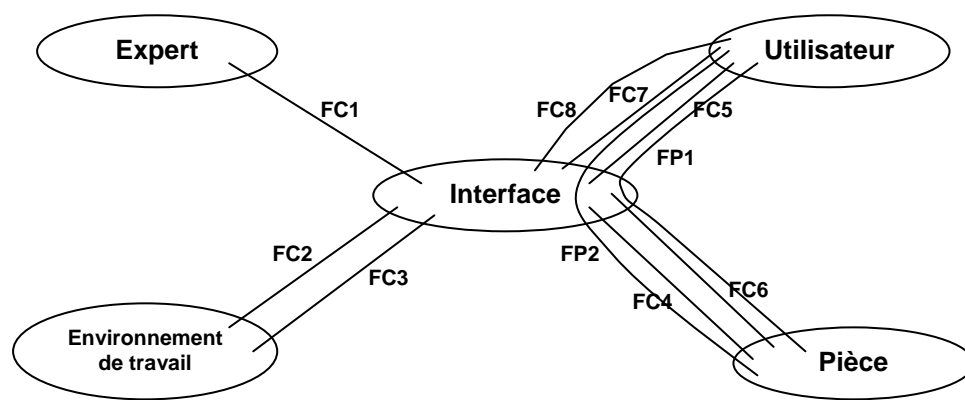


Figure 72 : Graphique de l'analyse fonctionnelle

Nous avons alors comme fonctions principales :

FP1 : L'utilisateur doit se servir de l'interface pour savoir s'il doit accepter ou non la pièce.

FP2 : L'utilisateur doit se servir de l'interface pour suivre la procédure de contrôle

Nous avons alors comme fonctions de contraintes :

FC1 : L'expert doit pouvoir échanger et modifier facilement avec l'interface le niveau qualité, les zones à identifier... tous les paramètres d'entrée pour l'utilisateur.

FC2 : L'interface doit se « fondre » dans l'environnement de travail.

FC3 : L'interface doit être réalisée sur un logiciel facilement adaptable et commun.

FC4 : Les pièces doivent pour être saisie dans l'interface par scannage en début de contrôle.

FC5 : L'utilisateur doit se servir de l'interface le plus facilement possible tant au niveau d'interface (ergonomie) qu'au niveau saisi (utilisation de la souris limitée).

FC6 : L'interface doit être utilisable pour toutes les références de pièces.

FC7 : Après la fin d'une saisie de pièce, l'interface doit faire le bilan des anomalies non acceptées et doit laisser la possibilité de modifier une anomalie saisie (l'erreur est humaine !) tout en gardant une trace de cette modification.

FC8 : Les utilisateurs doivent s'identifier par scannage (de matricule) pour utiliser l'interface en début de contrôle.

✖ *L'interface*

L'interface ainsi obtenue reprend entièrement la procédure de contrôle qui a été réalisée. Il est alors imposé aux contrôleurs de suivre pas à pas cette procédure.

Chaque contrôleur devra alors, après avoir rentré différentes données d'entrée - matricule, référence de la pièce, numéro de lot ..., saisir zone après zone les anomalies qu'il perçoit. Pour chaque anomalie, il notera l'intensité de chacune comme le montre la Figure 73.

The interface shows a window titled 'Zone de contrôle' with a tabbed menu at the top containing 'Fond', 'Dessous de cornes', 'Poinçons', 'Intérieur corne', 'Cran de glace', and 'Glace'. The 'Fond' tab is selected. Below the tabs is a window titled 'Evaluation des anomalies' containing a table with 6 rows and 4 columns labeled M, T, D, and P. A red 'X' is marked in the cell at row 4, column M.

	M	T	D	P
1				
2				
3				
4	X			
5				
6				

Figure 73 : Principe des saisies des anomalies dans l'interface

Nous voyons donc sur la Figure 73, le mode de saisie des anomalies par le contrôleur. Sur cet exemple, le contrôleur a saisi sur le *Fond* (zone de l'anomalie), une *Marque* (nom de l'anomalie) nommée "M" d'intensité 4.

Pour faire défiler les zones à contrôler (dans l'exemple, *Fond*, puis *Dessous de cornes*, puis *Poinçons*, ...), le contrôleur appuie sur une pédale ce qui lui permet de gagner du temps dans le défilement de la procédure. Il n'est donc pas obligé de poser la pièce pour faire défiler la procédure. La seule cause qui l'oblige à poser sa pièce, est la saisie d'une anomalie qui se fait grâce à la souris de l'ordinateur ce qui le rend responsable de sa saisie. Une croix rouge vient s'inscrire dans la case où le contrôleur a cliqué.

A la fin du déroulement de la procédure de contrôle, un bilan des anomalies saisies est réalisé par l'interface (Figure 74). L'interface donne donc la décision finale au contrôleur en lui disant d'accepter (notée "OK") ou de refuser (notée "KO") la pièce suivant ce qu'il a déclaré lors de son contrôle. Le contrôleur n'est donc plus maître de la décision finale.

Rapport contrôle boîte

Ref n° : **8881H.3544G.96** Matricule du contrôleur : **nico**

n° de série : **014586636** Date : **22.06.07 09:53:04**

Série	Référence	Intensité	Défaut	N° opération	Opération
014586636	8881H.3544G.9.1		Marque	2	Le fond (plein ou saphir)
014586636	8881H.3544G.9.5		Marque	8	La bande de carrure
014586636	8881H.3544G.9.2		Déformation	11	Les correcteurs
014586636	8881H.3544G.9.6		Particule	14	Le cran de glace du dess
014586636	8881H.3544G.9.1		Marque	15	Dessus de la glace






Liste des éléments manquants:

Remarques:

Signature responsable

KO

Figure 74 : Décision finale donnée par l'interface

La Figure 74 nous montre donc le résultat de l'interface après la saisie des données par le contrôleur.

Ce rapport reprend donc dans une première partie notée 1, toutes les données générales sur la pièce contrôlée et sur le contrôleur : référence de la pièce, numéro de série, date, heure, matricule du contrôleur.

Dans une seconde partie notée 2, le rapport reprend toutes les anomalies perçues et donc saisies par le contrôleur. Par exemple, ici, la première anomalie est une marque sur le *Fond* qui correspond à l'étape de 2 de la procédure de contrôle (numéro d'opération).

Grâce au schéma de la boîte, partie notée 3, il est indiqué que cette anomalie sur le *Fond* est acceptable. En effet, l'interface va alors donner anomalie par anomalie l'acceptation de la pièce. Le vert indique que l'anomalie est acceptable, le rouge indique que l'anomalie est refusée. Dans l'exemple, seule la bande de carrure est en rouge, aussi cette anomalie est refusée ce qui va avoir pour conséquence de rebuter la pièce.

Une partie de la fenêtre du rapport est laissée à la disposition du contrôleur (partie notée 4), où il pourra alors indiquer ses remarques ou si certains éléments de la pièce sont manquants...

La partie 5 est la partie où l'interface qui intervient dans la prise de décision en ayant intégré les différentes combinaisons d'acceptabilité que nous avons tentées d'expliquer au chapitre 4.

Cette interface vient donc garantir le bon apprentissage de la méthode de contrôle tant au niveau de l'exploration que de l'évaluation. Elle va donc assurer un véritable suivi à la fois des pièces mais aussi de l'instrument de mesure. L'instrument de mesure sera alors évalué et pourra être rapidement recalibré par une formation si une dérive est perçue.

✱ Les indicateurs de performance

Ayant un nombre conséquent de données d'entrées par les contrôleurs, l'interface va donc être en mesure d'emmagasiner et de donner des indicateurs de performance par contrôleur, par référence de produit, par type d'anomalie ...

La Figure 75 en donne des exemples.

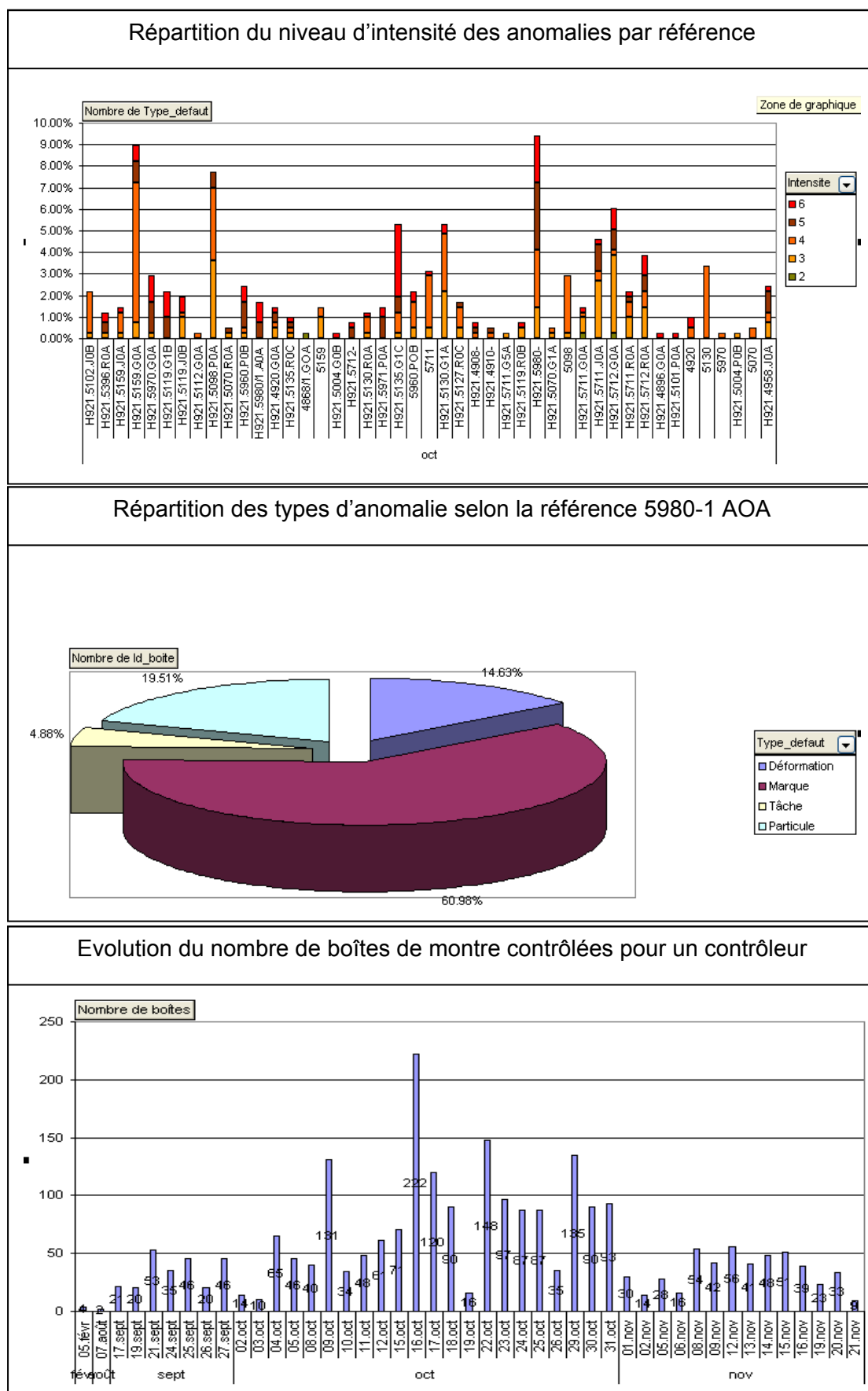


Figure 75 : Exemples d'indicateurs de performance pouvant être donnés par l'interface

Ces exemples d'indicateurs nous montrent donc la possibilité de mettre en place des actions :

- sur les références pouvant poser le plus de difficultés : indicateurs des niveaux d'intensités par référence (premier graphique) ou indicateur des types d'anomalies retenues pour une référence donnée (second graphique).
- Sur les contrôleurs : indicateurs sur le nombre de pièces contrôlées par jour, par mois (troisième graphique)....

Bien sûr ce ne sont que des exemples et toutes les données entrées par les contrôleurs dans l'interface peuvent être transformées en indicateur : nombre de pièces contrôlées par heure pour chaque contrôleur, nombre moyen d'anomalies par pièce, par référence...

5 LA MISE EN PLACE D'UNE STRUCTURE METROLOGIQUE CHEZ PATEK PHILIPPE

5.1 DU CONCEPT A L'APPLICATION...

La Figure 76 reprend l'organisation métrologique théorique décrite au chapitre 3 en l'associant à notre cas d'application.

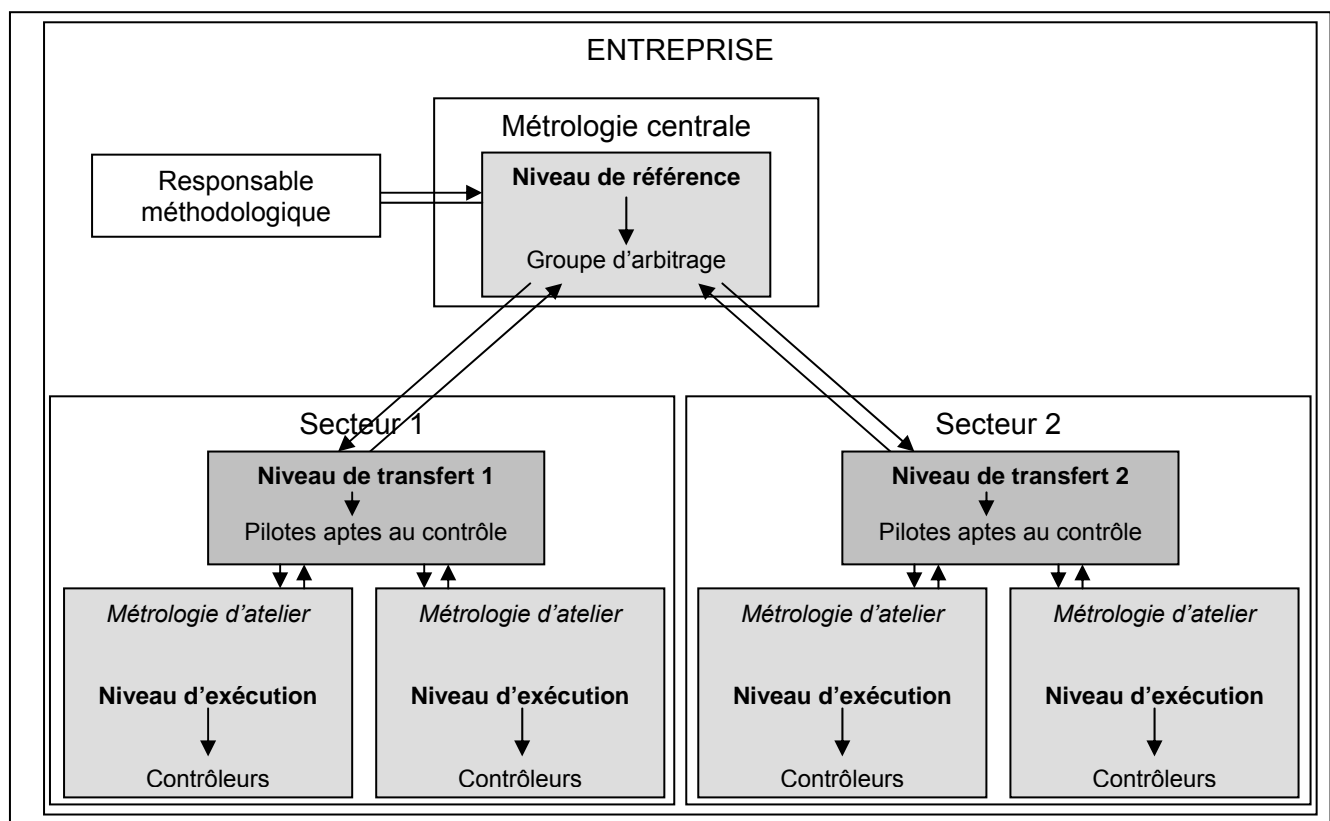


Figure 76 : Architecture Métrologie Sensorielle dans notre cas d'application

Chaque atelier de contrôle est donc un niveau d'exécution et par conséquent va utiliser la méthodologie mise en place afin de contrôler les pièces une à une et en limitant la variabilité dans ses contrôles.

Entre chaque atelier et afin de vraiment dissocier le niveau d'exécution et le niveau de référence, un niveau de transfert composé de personnes pilotes est mis en place. Ce niveau de transfert va donc être composé de personnes venant directement des ateliers mais considérées comme ayant des prédispositions pour être une rotule entre plusieurs ateliers et/ou niveaux. Elles sont étalonnées et ré étalonnées à intervalles définis afin de garantir la pérennité de la méthode. Ces personnes alors en relation à la fois avec le niveau inférieur et supérieur sont aussi un lien entre les ateliers d'un même secteur. Ils vont donc avoir un aspect critique sur l'aspect des pièces mais vont prendre en considération les autres interventions ultérieures ou postérieures de la production sur la pièce avant de décider quant à l'acceptabilité des pièces. Ce niveau représente donc un niveau de responsabilité quant à l'utilisation de la méthode par le niveau d'exécution mais aussi un niveau de réflexion sur la production en elle-même.

Le niveau de référence est un niveau que l'on pourrait se permettre d'appeler un niveau de litige. En effet, il est utilisé en cas de litige sur le niveau inférieur (niveau de transfert) quant à l'acceptabilité des pièces. En pratique, nous avons pu remarquer que ce niveau était utilisé dans deux cas de figures :

- les pièces où la prise de décision n'était pas seulement une question de critères esthétiques : problème économique, problème de délai, problème de procédés de mise en forme...
- les pièces où les anomalies ont été détectées en production et non en contrôle. Si nous reprenons la Figure 76, le secteur 1 présente des pièces au secteur 2 avant même de leur livrer pour effectuer leurs contrôles. Le secteur 1 a remarqué une anomalie sur les pièces et demande l'avis au secteur 2 avant la livraison. Cette manière de faire permet d'éviter les retours des pièces et des cas litigieux.

Aussi, en utilisant la méthode développée, le niveau de référence devient un étalon de prise de décision sur les critères esthétiques à la fois responsable des niveaux d'acceptabilité des pièces mais aussi responsable des problèmes bien souvent de production qui ne changent en rien les critères définis ultérieurement. C'est donc aussi un niveau de dérogation de pièces. Ce niveau reste alors le garant de la qualité prenant en considération tous les aspects nécessaires afin de produire "en quantité et en qualité".

Le responsable méthodologique représente le niveau garant de la métrologie définie. Il est donc, comme son nom l'indique, en charge de faire utiliser la méthode correctement suivant le niveau qui est visé. Il est donc garant de la méthodologie pouvant la modifier lorsque cela est nécessaire. Il va donc auditer chaque niveau et maintenir le respect de l'étalonnage du niveau inférieur par le niveau supérieur. Ce niveau est donc aussi un niveau support pour tous les autres niveaux.

5.2 LE CHEMIN QU'IL RESTE A PARCOURIR...

La métrologie que nous venons de décrire a été mise en place dans l'entreprise à partir du concept que nous avons décrit dans le chapitre 2. Cette mise en place a été réalisée petit à petit en respectant l'ensemble des acteurs concernés. Cependant, développer une métrologie comme nous venons de la décrire doit être réalisé de manière très méthodique pour ne brusquer et ne frustrer personne. En effet, cette métrologie fait intervenir des niveaux de compétence sans même considérer les niveaux hiérarchiques de la société. Il est donc possible que ce dernier élément puisse parfois engendrer quelques tensions au sein des ateliers et entre ateliers. Il est donc nécessaire de continuer à travailler sur cette nouvelle organisation afin que chaque acteur trouve sa place et son importance personnelle dans le schéma organisationnel.

De plus, le système d'étalonnage et de ré étalonnage est encore très primaire. En effet, même si chaque niveau a la responsabilité de l'étalonnage et du ré étalonnage du niveau inférieur, les tests sont encore en grande partie réalisés par le responsable méthodologique. Or, le rôle de ce dernier est de superviser ces étalonnages, d'en réaliser quelques uns dans le but de réaliser des audits mais pas de les réaliser en majorité. Il est donc nécessaire de continuer à prendre de la maturité sur les étalonnages et sur les ré étalonnages afin d'arriver à rendre ces derniers automatiques et réalisés par les personnes concernées. Il faut entendre par automatique, le fait de réaliser ces derniers suivants les intervalles de temps figés auparavant mais aussi sur l'organisation en terme de sorties des pièces de la production, de conditions de contrôle...

La formation donnée pour réaliser des contrôles est assez longue à l'heure actuelle. Bien souvent, les personnes entrantes dans l'entreprise ne sont pas issues de l'horlogerie et du contrôle. C'est pourquoi, le simple fait d'assimiler le produit en termes de manipulation, d'appréhension au toucher, de contrôle dimensionnel, de contrôle fonctionnel, de contrôle esthétique est long et contraignant.

Cependant, nous rappelons que la démarche que nous proposons peut être déployée sur l'ensemble des composants de l'entreprise.

Notre objectif est donc de proposer une formation type avec un composant où son assimilation personnelle est rapide. Citons par exemple, le cas du bracelet en cuir. La manipulation de ce composant est simple et le risque de créer des anomalies dessus est peu élevé contrairement à une boîte de montre. De ce fait, l'appréhension que peut ressentir le contrôleur devant ce composant est minime. Les différents contrôles à effectuer sont faciles et leurs mises en place ne demandent pas une formation poussée. L'apprentissage de la démarche d'exploration et d'évaluation sur ce composant paraît donc plus adéquat afin de juger plus rapidement des prédispositions ou non du contrôleur.

Face à ce constat, il faut envisager la création d'une cellule de formation basée sur un composant simple pour juger de l'aptitude d'une personne rapidement. Chaque personne qui doit être engagée sera alors formée sur un tel produit et donc jugée sur son aptitude rapidement.

Ce point permet donc de garantir la qualité souhaitée par l'entreprise lors de la livraison de ses produits. En effet, chaque contrôleur est responsable de l'image de marque de l'entreprise par son exploration et son évaluation des anomalies. Dans le cas d'une formation longue, la multiplication des contrôles a autrefois permis d'obtenir cette qualité. Une formation rapide et efficace de ce dernier est donc importante pour obtenir la garantie de cette qualité à atteindre plus facilement.

Cette formation ne doit pas s'arrêter là. En effet, pourquoi attendre qu'une personne arrive dans un atelier pour travailler en tant que contrôleur ? Pourquoi former cette personne si après étalonnage elle est jugée comme inapte à effectuer des contrôles ? Pourquoi étalonner cette personne dans ce cas là... ?

Même si nous choisissons un composant adéquat pour former les nouveaux arrivants, cette formation reste une chose coûteuse pour une entreprise. En effet, la personne apporte à l'atelier un nombre de pièces réalisées non négligeables. C'est pourquoi, une personne en formation ne peut pas, du même coup, réaliser des contrôles de production. Cette main d'œuvre est considérée perdue même si le principe premier d'effectuer une formation reste à plus long terme un gain essentiel pour l'entreprise comme nous avons pu le voir précédemment. Nous envisageons donc de faire passer des tests d'aptitude au contrôle dès l'entretien d'embauche. Ces tests seraient basés sur des principes simples qui permettent de détecter des prédispositions ou des aptitudes. Nous sommes en train de travailler sur ce concept. Ces tests seront donc par exemple, des tests d'acuité visuelle, des tests basés sur le principe des jeux où l'on présente deux images et où il faut trouver les 7 erreurs...

6 LES RESULTATS OBTENUS

Après avoir réalisé le concept de notre démarche, nous l'avons appliqué sur un projet pilote dans l'entreprise avec laquelle nous collaborons. Cependant, comme toute démarche, il est nécessaire de faire le bilan sur les résultats obtenus à partir de l'application que nous avons réalisée. Bien sûr et ce fut l'une des problématiques de notre étude, notre démarche est basée sur des éléments subjectifs tel que l'instrument de mesure i.e. l'humain. De ce fait, nos résultats seront alors autant mesurables que non mesurables comme nous allons le montrer ci-dessous.

6.1 CE QUE L'ON SAIT MESURER

La conduite du projet pilote a contribué à améliorer un certain nombre d'indicateurs que l'on peut lier au projet tels que :

- le nombre de retours client-fournisseur
- le nombre de pièces en retouche
- le délai de livraison des pièces
- les retours clients :

- **le nombre de retour client-fournisseur** : chaque atelier étant le client et le fournisseur d'un autre atelier, nous sommes en mesure d'analyser les indicateurs de chacun de ces ateliers. Ces retours sont dus aux exigences clients. Le client reçoit des pièces, détecte des anomalies dessus et les renvoie à son fournisseur déclarant ces pièces comme *Non conforme*. C'est pourquoi, en prenant par exemple un indicateur tel que nombre de retour entre deux ateliers proportionnellement aux nombres de livraisons, nous sommes capables de conclure ou pas quant au gain que notre démarche a pu apporter.

Notre démarche a donc été développée au sein de Patek Philippe dans un premier temps de manière pilote entre deux secteurs. Nous avons alors cherché à faire rentrer un troisième secteur dans cette approche pour constater si la démarche que nous proposons, était applicable dans sa globalité. Ce troisième secteur a donc suivi à partir du mois de Janvier 2008 la démarche que nous avons définie tout au long de ce mémoire : *Préparation, Construction, Validation et Utilisation* de la démarche.

Les progrès au niveau de l'aspect esthétique des pièces ont été nettement perçus par une diminution des retours entre ateliers comme nous le montre la Figure 77.

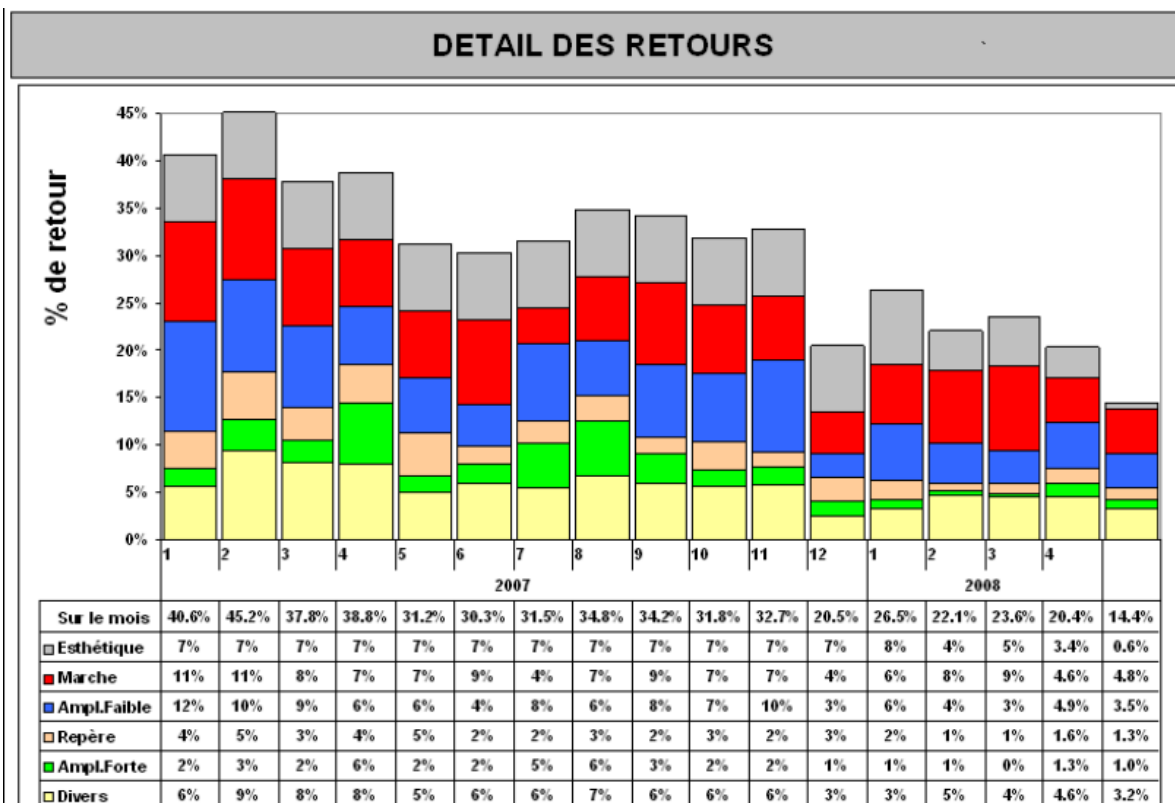


Figure 77 : Extrait de l'indicateur des retours du secteur 3

La Figure 77 nous montre le détail sur les retours entre un atelier de fabrication et un atelier de contrôle. Cet atelier de contrôle effectue à la fois des contrôles fonctionnels, ce qui apparaît sur la figure par les termes *Marche*, *Ampt.Faible*, *Repère*, *Ampt.Forte* et *Divers* et des contrôles esthétiques, ce que nous pouvons extraire de la figure par le terme *Esthétique*.

Nous voyons alors sur cette figure la diminution importante entre Janvier 2008 et Février 2008 et qui ne cesse de progresser, étant en Mai 2008 à 0,6% au lieu de 8% en janvier 2008. Nous pouvons donc conclure sur la pertinence de cette méthode dans ses effets bénéfiques au niveau des retours esthétiques. Cet indicateur récemment suivi induit une amélioration des autres indicateurs.

- **le nombre de pièces en retouches** : la diminution des retouches (retravail en terme horloger) était l'un des objectifs lors du développement de la démarche que nous proposons. Nous rappelons que le retravail a deux conséquences possibles sur le produit : l'une est la possibilité de provoquer d'autres anomalies en voulant corriger celle pour laquelle la pièce a été mise en retravail ; et l'autre est le fait que toute pièce mise en retravail va connaître un retard plus ou moins important sur sa livraison. Aussi, à l'heure actuelle, nous ne pouvons pas répondre totalement et de manière chiffrée au gain supposé de la démarche vis-à-vis du retravail. En effet, la démarche n'a été que partiellement développée, tout d'abord sur un projet pilote puis sur quelques ateliers de contrôle. Aussi, pour pouvoir chiffrer de manière précise le gain éventuel, il faudrait à la fois développer la méthode sur les ateliers de contrôle mais aussi sur l'ensemble des ateliers de fabrication, et ce tout le long de la production. Or même si la démarche a été maintenant développée sur l'ensemble des ateliers de contrôle, il reste néanmoins à l'étendre à la plus part des ateliers de fabrication.

Cependant la réduction des retours client entre atelier montre à la fois un meilleur jugement de l'atelier fournisseur, mais également une réduction des retours inutiles par l'atelier client. Cette réduction a été constatée par une forte réduction du nombre de produits en litiges entre deux ateliers.

A noter qu'il a été décidé de dupliquer la démarche tout d'abord aux ateliers de contrôle afin de garantir la mesure par les experts eux mêmes. Puis les ateliers de fabrication seront formés. Les ateliers de contrôle pourront alors répondre de façon experte à l'exploration et l'évaluation des pièces et ainsi donner une vision claire sur les standards à utiliser aux ateliers de fabrication.

- **le délai de livraison des pièces** : ce point est lié aux deux points précédents. En effet, les problèmes de délai de livraison sont attachés soit aux retours entre atelier client-fournisseur pour des problèmes de non-conformité, soit aux retravaux des pièces suite à des anomalies détectées.

- **les retours clients** : lorsque l'on utilise le terme "*retour client*", il s'agit de retour de pièces du client final i.e. dans notre cas, du consommateur. Cependant, cet indicateur ne peut pas être pris en considération pour voir les bénéfices de notre démarche. Patek Philippe a toujours produit des pièces d'une excellente qualité esthétique. Ce niveau de qualité a pu être atteint autrefois en multipliant les contrôles. Néanmoins, notre démarche a eu pour finalité de réduire ces contrôles et de proposer une méthode d'exploration et d'évaluation plus fiable afin de répondre et de garantir cette même qualité. Les indicateurs traitant des retours client n'ont donc pas connu de grande modification. Cependant, c'est la façon d'arriver à ces bons résultats qui a été bouleversée.

6.2 CE QUE L'ON NE SAIT PAS MESURER

Outre la forte réduction des litiges, la démarche a conduit à des modifications structurelles et culturelles qu'il n'est pas possible de quantifier tels que :

- la plénitude des personnes
- le gain de temps en dialogue et non en polémique
- le gain de temps en communication
- les effets de la démarche sur l'ensemble des contrôleurs

- **la plénitude des personnes** : cette démarche a apporté une réelle plénitude dans le travail des contrôleurs. Autrefois, souvent pris à partie pour des jugements changeant, la démarche leur permet maintenant de se baser sur un système d'évaluation. Ce système représente une justification et une preuve sur la décision finale et ne peut plus être remis en considération. En suivant cette démarche, les contrôleurs font respecter leur décision car elle découle d'un raisonnement fondé.

- **le gain de temps en dialogue et non en polémique** : ce gain n'est pas négligeable. Lors de la détection d'une anomalie, le réflexe était de trouver un responsable : par exemple, est-ce le client ou le fournisseur lors d'une manipulation qui a abîmé la pièce ? Néanmoins, notre démarche a développé un dialogue entre les différents niveaux que nous avons décrit dans la partie organisation métrologique. Aussi, le temps passé sur une anomalie est totalement consacré au traitement des causes et des conséquences de cette dernière et non plus aux responsabilités à repérer.

- **le gain de temps en communication** : Le rapport client-fournisseur est devenu un rapport d'entraide et non plus de forces. Les ateliers travaillent donc en partenariat. Ce temps de

communication est capital. Il permet la formation aux produits, aux principes de fabrications... des ateliers voisins. La communication va donc permettre de comprendre les problèmes de chacun face à sa capacité de réaliser des pièces comme le client le souhaite.

- **les effets de la démarche sur l'ensemble des contrôleurs** : Le changement imposé aux contrôleurs a été très important. En effet, en l'espace de quelques mois, il leur a été demandé de modifier entièrement leur façon de faire et d'utiliser une démarche très dirigée. Il est alors difficile de mesurer les effets de cette démarche sur les contrôleurs. Mais nous avons remarqué que plus le projet avance plus les contrôleurs se sentent impliqués par ces standards. Alors bien sûr, même si le changement est toujours mal perçu, un travail de communication et de participation à l'évolution de la démarche a été réalisé. Les contrôleurs ont la possibilité de donner leur avis et de proposer des solutions aux aléas que toute nouvelle démarche rencontre.

6.3 UNE NOUVELLE VISION DES CHOSES...

Nous venons de voir les modifications culturelles que l'ensemble de ces changements ont apportées vis-à-vis des contrôleurs. Cependant, et c'est le but de ce paragraphe, il est aussi important de noter et de recenser les diverses transformations au sein même de la société dans laquelle nous avons mis en place l'ensemble des démarches exposées tout au long de ce mémoire.

Ces démarches ont donc eu des apports qui ont engendré une véritable petite révolution au sein des contrôles réalisés chez Patek Philippe. En effet, après avoir agi sur les ateliers de contrôle en réalisant les actions nécessaires pour développer les différentes démarches que nous avons proposées, la vision du contrôle chez Patek Philippe a connu un véritable bouleversement. Il est maintenant considéré comme un contrôle totalement basé sur des mesures rendues quantitatives. Ce constat a été l'un des points forts lors du bilan réalisé au bout de ces trois années de travail. La vision du contrôle sensoriel est alors passée d'un contrôle dit subjectif à un contrôle où la mesure finale découle d'un cheminement construit méthodologiquement.

Le gain pour l'entreprise, on le comprend, est très important. Chaque contrôle devient donc justifié et justifiable. En effet, provenant d'une démarche méthodique, la multiplication des contrôles pour arriver à un résultat semblable n'est plus obligatoire et la conformité des pièces n'est plus basée sur l'humeur ou le savoir faire non fondé d'une personne.

Au sein de Patek Philippe, nous pouvons dire que le contrôle sensoriel n'est donc plus ou très peu subjectif mais est surtout vu comme méthodologique.

Le contrôle visuel des pièces est devenu alors un contrôle considéré en tant que tel. Plus du tout sous-estimé comme étant réalisé suivant le bon vouloir des gens et suivant leur sensibilité, il est à présent vu comme un contrôle à part entière. Nous avons vu dans ce mémoire que pour Patek Philippe, la qualité esthétique de ces produits comptait autant que la qualité fonctionnelle. A présent, il en va de même pour le contrôle : le contrôle esthétique est perçu aussi réaliste que le contrôle dimensionnel, ce qui n'était pas le cas malgré tout l'importance qui lui était donné dans l'entreprise.

Le contrôle sensoriel est donc reconnu et la mesure finale ainsi obtenue est basée sur des critères considérés par tous comme permettant une totale justification des résultats. De ce fait, dans l'entreprise, le contrôle sensoriel est aujourd'hui vu comme faisant appel à de véritables expertises. Autrefois, considéré comme un travail pouvant être réalisé par tout le monde, le contrôle sensoriel connaît maintenant une toute nouvelle attention vis-à-vis des personnes auxquels il est demandé de réaliser cette tâche.

Nous avons donc vu les changements culturels pour l'entreprise suite à la mise en place des différentes démarches que nous avons proposées. Néanmoins, ces changements ne sont pas les seuls que l'on doit répertorier. En effet, nous avons aussi noté et participé à deux gros changements organisationnels.

Notre démarche a permis de définir des valeurs références associant le nom de l'anomalie, l'intensité de l'anomalie et sa localisation sur la pièce. Ces valeurs de référence sont donc figées et seul le niveau de référence défini dans l'organisation métrologique peut les modifier. Aussi, cette nouvelle politique d'entreprise a donc permis de mettre en place une démarche de dérogation sur certaines pièces considérées *Non-conforme* en suivant notre méthode d'évaluation mais dont différents aspects (coût de retravail important, difficulté de réaliser la pièce, lot important, pièce unique et rare...) peuvent parfois modifier cette décision de non conformité en conformité. Avant la mise en place de notre méthode d'évaluation, cette décision était bien évidemment aussi prise dans ce sens mais non formalisée ce qui provoquait des incompréhensions sur différents points pour les contrôleurs : Doit-on accepter à présent ce type d'anomalie ? Pourquoi ils ont accepté cette pièce ? ... Maintenant le processus est plus simple. Pour chacune de ces pièces où une anomalie a été acceptée malgré une non-conformité avérée, une demande de dérogation est formulée, renseignée sur un formulaire prévu à cet effet et acceptée ou non par le niveau de référence. Les valeurs de référence ne sont pas modifiées pour autant et toutes les personnes concernées bénéficient de l'information vis-à-vis de la mise en application d'une dérogation dans le flux de production.

7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons montré l'application de nos propositions au sein de Patek Philippe en montrant ce qui a été fait et ce qui reste à faire. Bien sûr comme tout changement, cette application au sein de la production n'a pas été évidente à faire comprendre et à faire adhérer. Nous avons alors cherché aussi à exposer ces difficultés rencontrées en plus des réels changements que cela occasionne. Ces changements sont certes d'ordre organisationnel, la création d'une interface de contrôle devant être utilisées par les contrôleurs, mais aussi culturels sur la position d'une part des contrôleurs dans la société et d'autre part de l'entreprise vis-à-vis des contrôles enfin maîtrisés.

Le contrôle sensoriel est alors devenu un contrôle à part entière et surtout considéré comme un contrôle ayant des mesures fiables auxquelles il est possible de se raccrocher en cas de désaccord ou de litige. Aujourd'hui, le contrôle sensoriel est aussi performant et son résultat aussi respecté qu'un contrôle dimensionnel, autrefois seul à être reconnu comme tel.

Nos travaux ont permis de faire de ce contrôle sensoriel, un contrôle qui découle d'un processus, qui répond par une mesure à une éventuelle acceptabilité du produit final et qui s'inscrit dans une organisation métrologique.

Cependant, du chemin reste à parcourir...

Le prochain chapitre, qui est le dernier de ce mémoire, sera consacré à la conclusion générale de notre thèse et aux perspectives qu'elle ouvre.

Conclusion Générale

Bilan et Perspectives

1 BILAN GLOBAL DE LA THESE

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire ont porté sur la réduction de la variabilité visuelle dans le cadre d'une perception réalisée entièrement par l'être humain. L'objectif était donc de proposer une démarche générique et une application de cette démarche. De plus, la principale contrainte était que cette démarche soit adaptée à un contexte très difficile à cause de la subjectivité que l'être humain engendre dans sa perception. Afin de mettre en relief les principales contributions de nos travaux, nous rappelons les différentes étapes de notre réflexion et de son application.

Au cours du premier chapitre, nous avons tenté de comprendre les différentes notions que notre problématique engendre. Tout d'abord, il s'agissait de répondre à un contexte bien particulier : la *Qualité subjective*. De ce fait, nous avons alors analysé l'ensemble des contrôles que la littérature propose tant au niveau fonctionnel que technique permettant d'assurer la robustesse de la démarche définie. Présentant alors un certain nombre de types de contrôles, nous avons proposé d'utiliser des méthodes caractérisant l'évaluation subjective et préconisées par l'*Analyse Sensorielle*. Les différentes démarches mais aussi les difficultés de mise en place de ces démarches ont donc été listées et expliquées afin de bien comprendre les choix qui ont été effectués ultérieurement. Ajouté à ces notions de l'Analyse sensorielle, nous avons défini ce que nous entendions en termes de métrologie afin de garantir la bonne utilisation et le maintien de tous les livrables obtenus grâce à ces méthodes. Nous avons donc dans un premier temps défini la métrologie telle qu'elle est le plus souvent exposée dans un contexte dimensionnel. Puis nous avons développé la *Métrologie Sensorielle* telle que la littérature peut la définir même si cette dernière est très timide sur ce terme.

Dans le second chapitre, nous avons à partir des méthodes et outils déjà existants proposé une démarche permettant de réduire la variabilité de l'évaluation humaine. Cette démarche basée sur l'une des démarches préconisée par l'*Analyse Sensorielle*, nous a permis de décrire la méthode que nous avons exposée.

Nous avons proposé de décomposer le système de réflexion mentale vis-à-vis de la décision conduisant au jugement final d'acceptation ou de refus en dissociant deux expertises :

- l'expertise d'exploration : il s'agit de percevoir les problèmes de qualité du produit
- l'expertise d'évaluation : il s'agit d'évaluer les problèmes de qualité du produit

Aussi, ces deux étapes souvent oubliées lors du jugement humain sont primordiales pour réduire sa variabilité.

A partir de ce constat et de cette démarche, il a ainsi pu être possible de définir la notion de *mesure sensorielle* c'est-à-dire la réalisation d'un cheminement afin de donner une valeur à une chose qui au tout départ n'était pas mesurable.

Nous avons alors, à partir de la démarche générique que nous avons exposée, montré comment ces deux expertises pouvaient être prises en considération lors d'un jugement sur une anomalie perçue lors d'un contrôle qualité visuelle.

Le troisième chapitre nous montre, à partir de ce qui a pu être défini pour permettre une réduction de la variabilité de la mesure humaine, que la notion de métrologie est nécessaire dans notre problématique. En effet, notre problématique touchant le contrôle qualité - notion rarement traitée dans le cas d'une approche sensorielle -, cela implique l'existence d'une métrologie afin de garantir la mesure et la capabilité du moyen de mesure en terme d'étalonnage et de stabilité dans le temps. La métrologie dimensionnelle vient alors au secours de la *Métrologie Sensorielle*. Notre objectif dans ce chapitre était donc de proposer une *Métrologie Sensorielle* à l'égale de ce qui se fait en métrologie dimensionnelle en répondant à certaines notions capitales :

- création d'un test $R^2 \& E^2$ (Répétabilité et Reproductibilité de l'Exploration et de l'Evaluation) permettant de mettre en évidence la variabilité et de comprendre sa cause (problème d'exploration ou problème d'évaluation)
- création d'une organisation métrologie avec des niveaux différents d'étalons permettant des étalonnages successifs et réguliers afin que la *Mesure Sensorielle* effectuée réponde aux critères voulus.

Notre *Métrologie Sensorielle* ainsi définie va alors garantir la *Mesure Sensorielle* et l'*instrument de mesure sensorielle* c'est-à-dire l'être humain.

Nous avons défini et réalisé toute une démarche pour effectuer de manière entièrement répétable et reproductible la *Mesure Sensorielle* d'une partie du produit – dans notre cas d'anomalie perçue. Dans le quatrième chapitre, nous allons construire le mécanisme permettant de juger de l'acceptabilité ou non du produit dans sa globalité. Cette évaluation du produit dans sa globalité est basée sur la fonction perte de Taguchi et sur le principe d'une combinaison quadratique utilisant l'*Inertie Sensorielle*. La méthode d'évaluation prend en compte toutes les anomalies remarquées par la perception sensorielle et évaluées par l'être humain formé à la méthodologie définie au chapitre 2.

Le cinquième chapitre de ce mémoire est dédié à la mise en application de tous ces développements :

- amélioration de l'exploration du produit
- amélioration de l'évaluation d'une anomalie
- détection de la variabilité de la mesure
- réduction de la variabilité de la mesure
- mise en place d'une *Métrologie Sensorielle*
- amélioration de l'évaluation du produit dans sa globalité en prenant en compte toutes les anomalies perçues.

Cette mise en application est donc réalisée dans la société avec laquelle nous avons collaboré durant ces trois années de thèse : Patek Philippe

2 LES PERSPECTIVES DE LA RECHERCHE

Ce travail est une première approche qui visait à valider l'hypothèse de l'utilisation de l'analyse sensorielle pour le contrôle de la qualité visuelle d'un produit. Les travaux que nous décrivons dans ce mémoire, nous ont donc permis de valider cette hypothèse : L'Analyse Sensorielle peut être appliquée à un contrôle visuel.

A partir de cette validation et comme le terme "*contrôle*" le sous-entend, une partie métrologique est nécessaire pour réduire et garantir une variabilité acceptable.

Cependant, sur l'ensemble des propositions que nous avons faites, de nombreuses questions restent encore à résoudre et permettent d'entrevoir quelques pistes principales de perspectives de recherche.

2.1 SUR LA DEMARCHE APPLIQUEE

Lors de nos travaux de recherche, nous avons obtenu des résultats très encourageants. Il semble donc que la séparation entre exploration et évaluation en deux expertises pour réaliser un contrôle soit nécessaire pour obtenir des résultats répétables et reproductibles. Cependant, et c'est ce que nous allons développer ici, le travail présenté n'est pas complètement abouti. Mais alors, comment aller plus loin dans la méthode ? Comment améliorer nos propositions ?

✕ *Première piste de recherche : des efforts à fournir sur l'exploration du produit*

Cette première piste de recherche touche à la partie exploration du contrôle. Cette partie est en réalité la partie du contrôle la plus difficile à appréhender et à canaliser.

Aussi, nous avons vu précédemment que différentes actions ont été menées pour tenter de répondre à cette difficulté en modifiant les facteurs qui pourraient intervenir lors de la détection des anomalies.

Ce travail peut encore être amélioré en travaillant sur les autres facteurs proposés sur les 5M. C'est pourquoi, les actions en ce sens sont menées actuellement chez Patek Philippe en réalisant divers plans d'expériences.

Nous citerons par exemple, la situation des postes de travail ce qui va de pair avec la luminosité. En effet, suivant la situation du poste de travail, la perception du produit et donc de l'anomalie est différente. Nous avons commencé à travailler sur cette notion et surtout sur les lumières devant être utilisées pour effectuer correctement la mesure. Aussi, et c'est une des actions en cours actuellement, nous sommes en train de rechercher une lumière permettant d'obtenir une luminosité égale à tout endroit où peut être effectuée la *mesure sensorielle* c'est-à-dire dans notre cas, le contrôle. Il faut donc que cette lumière ait une intensité lumineuse plus importante ou égale à l'intensité lumineuse de la pièce où est conditionné chaque poste de mesure. En effet, nous savons que les intensités lumineuses ne s'additionnent pas, c'est la plus importante qui prend l'avantage.

Nous pouvons aussi citer la réflexion et le travail qui doivent être faits sur l'acuité visuelle et par conséquent sur l'aide offerte aux sujets pour percevoir les anomalies sur le produit. La question est la suivante : Faut-il une aide supplémentaire pour les personnes qui ont une acuité visuelle plus faible que d'autres personnes ? Faut-il par conséquent définir un grossissement de la loupe en fonction de l'acuité visuelle de la personne ?

Par exemple, nous pouvons alors penser qu'il serait possible de réaliser une corrélation entre l'acuité visuelle de la personne et la loupe qu'elle doit utiliser. Dans ce cas, il serait possible de lisser la capacité visuelle de l'ensemble des personnes et du même coup, d'obtenir un instrument de mesure identique pour chaque personne.

De ce constat, une question est alors naturelle : Est-ce que l'on ne touche pas les limites de la capacité d'un être humain à faire des contrôles visuels de cette précision ?

Dans un contexte de production, il est demandé à l'être humain de faire des contrôles 8 heures par jour pendant 5 jours par semaine. Est-ce possible d'être dans ce contexte aussi performant à toute heure de la journée ? Peut-on demander à l'être humain une tâche de ce type ?

Beaucoup de questions restent donc en suspens lorsqu'il s'agit d'utiliser l'être humain comme instrument de mesure pour les facultés optiques qu'il possède.

✱ *Deuxième piste de recherche : des efforts à fournir sur l'évaluation du produit*

Cette seconde piste de recherche touche à la partie évaluation du contrôle. Cette partie est la plus aboutie des deux parties composant le contrôle.

L'évaluation du produit a donné des résultats très encourageants à l'heure actuelle. Cependant, la démarche que nous avons proposée fait intervenir une grille qui est en perpétuelle évolution.

Il faut en effet, comprendre que malgré le travail qui a été réalisé, l'ensemble des termes employés dans la grille laisse place encore à une part de subjectivité. Par exemple, pour définir la longueur d'une *Marque*, il est possible d'employer comme terme "courte", mais nous pouvons nous demander : qu'est-ce que courte pour une *Marque* ?

Certes, des formations comme nous l'avons précisé dans le chapitre 3 sont mises en place pour apprendre la définition de ces termes mais malgré cela il faut bien avouer qu'il reste un aspect subjectif.

Faut-il définir la *Marque "courte"* comme un intervalle dimensionnel ? Ou faut-il au contraire la définir comme un rapport de surface entre celle de l'anomalie et celle de la zone où elle se trouve ?

L'ensemble des termes employés dans la grille doit donc être travaillé comme nous l'avons fait sur les descripteurs pour obtenir une véritable règle d'évaluation. Cette règle sera donc la combinaison de différentes règles permettant de définir clairement et sans subjectivité les termes à l'intérieur de la grille.

2.2 SUR LA DEMARCHE GENERIQUE

✱ *Troisième piste de recherche : la robustesse de la méthode*

Bien sûr il serait présomptueux de clamer haut et fort la certitude du développement de la démarche comme étant totalement générique.

Nous avons développé et mis en place la démarche au sein de deux secteurs de l'entreprise. Cette démarche a alors été utilisée dans un troisième secteur afin de pouvoir constater sa pertinence et sa capacité d'application. Les résultats dans ce troisième secteur ont aussi été très encourageants comme nous avons pu le voir dans le chapitre 5. Aussi, après avoir passé l'étape de l'éternelle résistance aux changements, l'ensemble des personnes étant concernées ne demande pas mieux que de faire partie de ce projet et d'utiliser cette méthode.

Cependant, et nous le reconnaissons, la démarche et les différentes contributions que nous proposons n'ont été testées et mises en place que sur l'entreprise Patek Philippe.

Il serait à présent utile et intéressant de refaire ce type de démarche dans une société ayant un produit et des critères totalement différents.

La démarche devrait donc être développée dans différentes sociétés provenant de différents secteurs et ayant aussi des structures différentes. Modifiant ainsi l'ensemble des paramètres pouvant influencer les résultats, la démarche serait alors considérée réellement comme générique ou pas.

Aussi, mettre en place un projet entre plusieurs entreprises pour évaluer la robustesse de la méthode serait des plus judicieux dans la validation de la démarche en tant que démarche générique.

✱ *Quatrième piste de recherche : un travail en amont*

Certains, retenant à notre projet, peuvent nous reprocher de ne pas avoir voulu rendre automatisée cette recherche d'anomalies sur le produit. Bien sûr, développer des instruments capables de formaliser la perception humaine peut être dans une certaine mesure réalisable comme nous avons pu le voir dans le chapitre 1. Mais, dans le domaine du visuel et au niveau de perception demandé dans notre cas, nous en sommes encore loin ! Cependant, il faut reconnaître que ce sera un jour possible et il est agréable de penser que le plus rapidement possible sera le mieux, enlevant alors une tâche ingrate à l'humain : rechercher les anomalies sur l'ensemble des pièces huit heures par jour. Cependant, tout ce travail était nécessaire en amont pour pouvoir réaliser cet instrument optique. Car dans le cas contraire, comment réaliser une machine sans avoir compris réellement le mécanisme utilisé par habitude par l'humain ? Ce travail est donc un travail en amont... alors à quand ces capteurs capables d'assister utilement l'expertise humaine ???

Nous pouvons alors imaginer un instrument capable de détecter l'ensemble des anomalies du produit. Proposant différents angles de rotation de la pièce et différentes lumières (lumière blanche, lumière du jour...), cet instrument optique donnerait donc la possibilité de limiter les anomalies non perçues. Dans un premier temps, nous pouvons imaginer que la détection des anomalies serait réalisée par l'instrument de mesure et son évaluation par l'être humain. Et dans un second temps, pourquoi ne pas demander à l'instrument optique d'être à la fois un instrument d'exploration mais aussi d'évaluation ?

✱ *Cinquième piste de recherche : l'exploitation des résultats*

Pour chaque contrôle effectué, nous avons mis en place un système d'exploration et d'évaluation permettant de réaliser un contrôle répétable et reproductible. L'ensemble des résultats et les informations permettant d'arriver à ces résultats sont alors emmagasinés. Nous avons donc enrichi la qualité de l'information lors des contrôles visuels réalisés. Cependant, nous n'avons pas encore exploité cette information. Il serait alors intéressant, grâce à cette information, de mettre en relation les anomalies et les causes potentielles. Cette relation permettrait alors de réaliser un travail de fond en amont afin de limiter l'apparition d'une nouvelle anomalie provenant des mêmes causes.

Aussi, il serait judicieux de réaliser un travail pour référencer l'ensemble des outils des statistiques inférentielles. Ce travail permettrait d'analyser si l'un de ces outils est capable de mettre en relation anomalie et cause et d'exploiter au mieux le type de données que l'on a emmagasinées.

✱ *Sixième piste de recherche : la métrologie sensorielle*

Au chapitre 3, nous avons proposé de réaliser une métrologie sensorielle basée sur une analogie avec la métrologie dimensionnelle.

Cependant, nous voyons bien que cette métrologie dimensionnelle est basée sur des étalons ayant différents niveaux d'étalonnage mais faisant intervenir des étalons aussi bien dans l'entreprise (étalons de travail) qu'à l'extérieur (étalons nationaux) dépendant, par exemple, de l'Institut national de métrologie.

La métrologie sensorielle que nous proposons reste alors très particulière : elle reste au niveau de l'entreprise ! Les étalons nationaux ont été remplacés par analogie par un garant permettant à la fois de garantir la méthode et l'utilisation de la démarche en réalisant des audits.

La métrologie sensorielle va donc faire intervenir non plus un étalonnage de l'instrument de mesure par des étalons mais un étalonnage de l'instrument de mesure (niveau inférieur) par les différents niveaux.

Dans ce cas, il serait important de mettre en place une démarche permettant une comparaison avec un organisme extérieur. Le niveau de référence est considéré comme étant le plus apte à évaluer une anomalie, il est donc comme le définit l'Analyse sensorielle expert de l'évaluation. Mais comment le comparer à un organisme comme cela est fait en métrologie dimensionnelle ? Peut-on créer un "organisme certificateur" sur l'étalonnage des experts sensoriels ? Cet organisme certificateur devrait donc suivre une démarche

totallement générique permettant alors de certifier autant un expert sensoriel utilisant le goût qu'un expert sensoriel utilisant la vue. Nous pouvons donc penser que dans un premier, il serait préférable de commencer par un ensemble d'entreprises de même type par exemple l'horlogerie, l'automobile... pour ensuite généraliser la démarche.

A partir d'un étalon, le monde du dimensionnel le permet alors pourquoi pas celui du sensoriel ?

Bibliographie

Liste des références

A

[AFN, X35-103, 1990] NF X35-103, Ergonomie - Principes d'ergonomie visuelle applicables à l'éclairage des lieux de travail, AFNOR Ed., Paris, 1990.

[Alvelos et al., 2007] Alvelos H., Sarsfield Cabral J.A., « Modelling and monitoring the decision process of wine tasting panellists », *Food Quality and Preference*, 18, pp. 51-57, 2007

[AIAG, 1998] Automotive Industry Action Group, *Measurement Systems Analysis, Reference Manual*, 2e ed, Detroit, MI, 1998

[AIAG, 2002] Automotive Industry Action Group, *Measurement Systems Analysis Reference Manual*, 3e ed, Detroit, MI, 2002

B

[Balin et al., 2007] Balin S., Giard V., « La qualité des services et leurs processus de production », *7ème Congrès international de génie industriel*, Trois-Rivières, Québec, 2007

[Bernstein, 1930] Bernstein, *Etudes contemporaines sur la physiologie du système nerveux*, Moscou, 1930

[Bergson, 1934] Bergson H., La perception du changement (conférences faites à l'Université d'Oxford les 26 et 27 mai 1911). In: *La Pensée et le Mouvant* (1934), repris dans les *OEuvres complètes de Bergson* («Edition du Centenaire»), Paris, 5° édition, pp. 1365-1392

[BON, 1995] Bonnardel P., Le coefficient Kappa, In site <http://kappa.chez.tiscali.fr>, 1995

[Bourdet et al., 1998] Bourdet P., Mathieu L., *Tolérance et métrologie dimensionnelle*, CETIM, 1998

[Burdick et al., 2003] Burdick, R.K., Borror, C.M., Montgomery, D.C., « A review of Methods for Measurement Systems Capability Analysis », *Journal of Quality Technology*, pp.342-354, 2003.

C

- [Cadas, 1996] CADAS, Académie des Sciences, *Quelle place pour la métrologie en France à l'aube du XXIème siècle ?*, 1996
- [Charbonneau et al., 1978] Charbonneau H. C., Webster G. L., *Industrial Quality Control*, Prentice Hall, Hardcover, 1978
- [Chollet et al., 2006] Chollet S., Valentin D., « Quelles compétences développe-t-on lors d'un court entraînement à déguster des bières ? », *4ème Journée du Sensolier : "les expertises sensorielles : nature et acquisition"*, Paris, 2006
- [Cibois, 2000] Cibois P., *L'Analyse Factorielle, Que sais-je?*, Presse Universitaires de France, 2000
- [CNOMO, 1991] CNOMO, *Moyens de production (Agrement Capabilite) des moyens de mesure Moyens de contrôle spécifique*, CNOMO E.41.36.110.N, 1991
- [Cohen, 1960] Cohen J., *A coefficient of agreement for nominal scales*, Educ. Psychol. Meas., 20, pp. 27-46, 1960
- [Cotteret, 2006] Cotteret M.-A., *Qu'est-ce que la métrologie ?*, <http://metrodiff.vaour.net/yacs/articles/>, consulté en 2006
- [CRIN, 1997] Club Crin Logique floue, *Evaluation subjective, Méthodes, Applications et Enjeux*, Les cahiers des clubs Crin, Association ECRIN, 1997
- [CTSCCV] Centre Technique de la Salaison, de la Charcuterie et des Conserves de Viandes, Maisons-Alfort (Val de Marne)

D

- [Dacremont, 2003] Dacremont C., « Croustillant : aspects méthodologiques de la mesure sensorielle d'une caractéristique de texture complexe », *Anthropology of Food*, 1, Septembre 2003, Crispy, Crunchy : a dream of consistency.../Croquant, croustillant, un rêve de consistance..., [En ligne], mis en ligne le 1 septembre 2003. URL : <http://aof.revues.org/document1227.html>.
- [Delteil, 2000] Delteil D., « Exemples de mises au point de méthodes d'analyse sensorielle », *Revue des Œnologues*, n°97, 2000
- [De Large, 2000] De Lagarde J., *Initiation à l'analyse des données*, Dunod, 3ème édition, 2000
- [Deming, 1982] Deming W.E., « Quality, productivity and competitive position », *MIT Center for advanced engineering study*, Cambridge, USA, 1982
- [Dumont-Fillon, 1996] Dumont-Fillon J., « Contrôle non destructif (CND) », *Les Techniques de l'Ingénieur*, 1996
- [Dumont et al., 2007] Dumont, Crochemore, « An example of a new parameter in perceived quality: instrumental characterization of touch », *RENAULT-France, 13^{ème} Congrès Métrologique*, Lille, 2007
- [Duret et al., 2005] Daniel Duret, Maurice Pillet, *Qualité en production de l'ISO 9000 à Six sigma*, Edition d'organisation, 3ème ed., 2005

E

[Ericsson et al., 1996] Ericsson, K.A., & Lehmann, A.C., « Expert and exceptional performance, Evidence of maximal adaptation to task constraints », *Annual Review of Psychology*, 47, 273-305, 1996

[Eurofins, 2006] Eurofins Scientific France, in site <http://www.eurofins.fr/>, consulté en 2006

F

[Faye et al., 2004] Faye P., Brénaud D., Durand Duabin M., Courcoux P., Giboreau A., Nicod H., « Perceptive free sorting and verbalization tasks with naive subjects: an alternative to descriptive mappings », *Food Quality and Preference*, 2004

[Fechner, 1860] Fechner G., *les Elemente der Psychophysik* (Éléments de psychophysique), 1860

[Fehner, 1877] Fechner G., *In Sachen der Psychophysik*, 1877 (Pour la psychophysique)

[Fleiss et al., 1969] Fleiss J.L., Cohen J., and Everitt B.S., « Large sample standard errors of kappa and weighted kappa », *Psychol. Bull.*, 72, pp.323-327, 1969

[Fleiss, 1978] Fleiss J.L., « Inference about weighted Kappa in the non-null case », *Appl. Psychol. Meas.*, 1, pp. 113-117, 1978

[Fleiss et al., 1979] Fleiss J.L., Cuzick J., « the reliability of dichotomous judgments: Unequal numbers of judges per subject », *Appl. Psychol. Meas.*, 3, pp. 537-542, 1979

[Foucart, 1997] Foucart T., *L'analyse des données*, Mode d'emploi, Didact statistique, 1997.

[Fritsch, 2001] Fritsch A., « Le toucher bientôt au cahier des charges », *Industries et Techniques*, n°831, pp.34-36, 2001

G

[Gaillard et al., 2006] Gaillard, P., Magnen, C., Billières, M., « Expertise phonétique : une réflexion vers la notion de "surdité phonologique" », *4ème Journée du Sensolier : "les expertises sensorielles : nature et acquisition"*, Paris, 2006

[Giboreau et al., 2001] Giboreau A., Navarro S., Faye P., Dumortier J., « Sensory evaluation of automotive fabrics: the contribution of categorization tasks and non verbal information to set-up a descriptive method of tactile properties », *Food Quality and Preference*, Volume 12, Issues 5-7, p311-322, 2001

[Gibson, 1969] Gibson E.J., « Trends in perceptual development, In an Odyssey in learning and perception », London: The mit press, A Bradford Book ed., pp 365-381, 1969

[Gibson, 1979] Gibson E.J., *the ecological approach to visual perception*, Lawrence Erlbaum Associates, 1979

[Giordano, 2006] Giordano J.-L., *L'approche Qualité perçue*, Editions d'Organisation, 1^{ère} édition, pp 380, 2006

- [Goasdoué, 2006] Goasdoué R., « Perception et action en contexte, apports de l'approche dynamique et écologique au geste technique », *4ème Journée du Sensolier : "les expertises sensorielles : nature et acquisition"*, Paris, 2006
- [Gotlieb et al., 1994] Gotlieb J.-B., Grewal D., Brown S.W., « Consumer Satisfaction and Perceived Quality : Complementary or Divergent Constructs », *Journal of Applied Psychology*, vol.79, n°6, pp. 875-885, 1994
- [Guerra et al., 2006] Guerra A.-S., Pillet M., Maire J.L., « Formalization of subjective knowledge by the sensory analysis », *Global Manufacturing and Innovation*, Coimbatore, India, pp. 103-110, 2006
- [Guerra et al., 2007] Guerra A.-S., Pillet M., Maire J.L., « Métrologie sensorielle pour un Contrôle Visuel des produits », *13^{ème} Congrès Métrologique*, Lille, 2007
- [Gufoni et al., 2005] Gufoni V. et al., « Les stratégies cognitives mises en œuvres dans une tâche de catégorisation de bières : comparaison entre sujets entraînés et sujets novices », *3ème Journée du Sensolier : "Catégorisation et catégories : des théories cognitives aux pratiques en évaluation sensorielle"*, Paris, 2005

I

- [ING, 1997] L'ingénierie centrée sur l'homme, *Rapport issu des Technologies Clés, disponible au centre de documentation du Ministère de l'Industrie, de la Poste et des Télécommunications*, pp17-19, 29-49, 1997
- [ISO 5492, 1992] ISO 5492 : 1992, *Sensory Analysis – Vocabulary* – NF ISO 5492, V09-021, 1992
- [ISO 8402, 1994] ISO 8402 : 1994, *Quality management and quality assurance – Vocabulary*, International Organization for Standardization, 1994
- [ISO 8586-2, 1994] ISO 8586-2 : 1994, *Analyse sensorielle – Guide général pour la sélection, l'entraînement et le contrôle des sujets, partie 2 : Expert*, International Organization for Standardization, 1994
- [ISO 9000, 1994] ISO 9000 : 1994, *Systèmes qualité -- Modèle pour l'assurance de la qualité en conception, développement, production, installation et prestations associées*, International Organization for Standardization, 1994
- [ISO 9000, 2000] ISO 9000 : 2000, *Systèmes de management de la qualité - Principes essentiels et vocabulaire*, International Organization for Standardization, 2000
- [ISO 9001, 2000] ISO 9001 : 2000, *Systèmes de management de la qualité – Exigences*, International Organization for Standardization, 2000
- [ISO 9002, 2000] ISO 9002 : 2000, *Systèmes de management de la qualité - Exigences pour la production, l'installation et le soutien après vente*, International Organization for Standardization, 2000
- [ISO 9004, 2000] ISO 9004 : 2000, *Systèmes de management de la qualité - Lignes directrices pour l'amélioration des performances*, International Organization for Standardization, 2000
- [ISO 100012, 2003] ISO 100012 : 2003, *Système de management de la mesure - Exigences pour les processus et les équipements de mesure*, International Organization for Standardization, 2003
- [ISO Guide99, 1993] ISO Guide 99 : 1993, *VIM : International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology*, International Organization for Standardization, Geneva, 1993

L

- [Landis et al., 1977] Landis J.R., Koch G.G., « The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data », *Biometrics*, Vol. 33, pp. 159-174, 1977
- [La Toison, 1986] La Toison M., Eclairage – Documentation, *Les Techniques de l'Ingénieur*, 1986
- [Lateur et al., 2001] Lateur M., Planchon V., Moons E., « Évaluation par l'analyse sensorielle des qualités organoleptiques d'anciennes variétés de pommes », *Biotechnol. Agron. Soc. Environ*, pp.180–188, 2001
- [Lewis et al., 1993] Lewis R.C., Booms B.H., « The Marketing Aspects of Service Quality », *Emerging Perspectives on Service Marketing*, Berry L.L., Shostack L. et G. U. Eds., American Marketing Association, Chicago, pp. 99-107, 1993
- [Liévin et al., 1993] Liévin D., François M., « Charge perceptive et fatigue visuelle dans le contrôle qualité », *INRS, Cahiers de notes documentaires*, n°150, 1993
- [Loréal, 2005] L'Oréal. Sensory Analysis. Disponible sur Word Wild Web, in site <http://www.loreal.ch/fr/ch/research/homeres.aspx>, consulté en 2005.
- [Loukil et al., 2005] Loukil Hadj Kacem H., Bouhlef M.S., « Mesure de la qualité des images par l'utilisation de la loi de Weber », *3rd International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications*, Tunisie, 2005

M

- [Martin, 2005] Martin N., Nestlé, Lausanne, « Comment les procédures de tri peuvent-elles être appliquées dans les industries agro-alimentaires », *3ème Journée du Sensolier : "Catégorisation et catégories : des théories cognitives aux pratiques en évaluation sensorielle"*, Paris, 2005
- [McCaslin et al., 1976] McCaslin J., Gruska G., « Analysis of Attribute Gage Systems », *ASQC Technical Conference Transactions*, 30, pp. 392-399, 1976
- [Meierhenrich et al., 2005] Meierhenrich U.J., Golebiowski J., Frenanadez X., Cabrol-Bass D., « De la molécule à l'odeur, Les bases moléculaires des premières étapes de l'olfaction », *L'actualité chimique*, n°289, pp.29-40, 2005
- [Meilgaard et al., 1999] Meilgaard M.C., Civille G.V., Carr B.T., *Sensory evaluation techniques*, CRC Press, 3rd ed, London, 1999
- [Meniszez et al., 2004] Meniszez L., Bassereau J.-F., « Evaluations sensorielles et optiques de l'état de surface des papiers couchés », Paris, 2004
- [Mojet et al., 2005] Mojet J. and Köster E.P., « Sensory memory and food texture », *Food Quality and Preference*, 16, pp.251-266, 2005
- [Morange et al., 2005] Morange S. et al., « Appartenances catégorielles d'un objet complexe, la voix : approches linguistiques et psycho-cognitives », *3ème Journée du Sensolier : "Catégorisation et catégories : des théories cognitives aux pratiques en évaluation sensorielle"*, Paris, 2005

N

[Nestlé, 2003] Nestlé, Création d'un Groupe de Recherche Nestlé-EPFL en perception sensorielle, http://www.research.nestle.com/MediaCenter/PressReleases/AllPressReleases/NestleEPFL_20030221.htm, 2003

[Nesa et al., 2004a] Nesa D., Courdec S., « Automobile : olfactive sensory analysis », *Congrès Colloque Sage Elastomères et Polymères : perception sensorielle*, n°829, pp. 34-40, Paris, 2004

[Nesa et al., 2004b] Nesa D., Crochemore S., Courdec S., « Analyse sensorielle des matériaux d'habitacle automobile : olfaction », *Les Techniques de l'Ingénieur*, chapitre AM 3 291, pp. 8 à 10, 2004

O

[Oregon, 1992] O'Regan K., « Solving, the 'real' mysteries of visual perception: The world as an outside memory », *Canadian Journal of Psychology*, 46, pp. 461-488, 1992

P

[Parasuraman et al., 1985] Parasuraman A., Zeithaml V.A., Berry L.L., « A Conceptual Model of Service Quality and Its Implications for Future Research », *Journal of Marketing*, Automne, vol. 49, n° 4, pp. 41-50, 1985

[Pensé et al., 2006] Pensé-Lhéritier A.-M., Guilabert C., Bueno M.-A., Sahnoun M., Renner M., « Sensory evaluation of touch a great number of fabrics », *Food Quality and Preference*, 17, pp. 482-488, 2006

[Pérez et al., 2007] Pérez Elortondo F.J., Ojeda M., Albisu M., Salmeron J., Etayo I., Molina M., « Food quality certification: An approach for the developpement of accredited sensory evaluation methods », *Food Quality and Preference*, 18, pp. 425-439, 2007

[Philippe et al., 2002] Philippe F., Schacher L., Adolphe D., Dacremont C., « Développement d'une méthodologie d'analyse sensorielle tactile des textiles », 2002

[Pillou, 2004], Pillou J.-F., Qualité - Introduction, in site www.commentcamarche.net, 2004

[Pillet, 2004] Pillet M., « Inertial Tolerancing », *The Total Quality Magazine*, Emerald Editor, Vol 16, Issue 3, pp. 202-209, 2004

[Pillet, 2005] Pillet M., *Appliquer la maîtrise statistique des processus MSP/SPC*, Editions d'Organisation, 4ème édition, 2005.

[Plichon, 1998] Plichon V., « La nécessité d'intégrer les états affectifs à l'explication du processus de satisfaction du consommateur », *Actes de la Conférence de l'Association Française du Marketing*, n°14, Vol 2, eds. Saporta B. et Trinquécoste J. F, Bordeaux, IAE, pp 671-694, 1998

R

[Rasmussen, 1989] Rasmussen J. L., « Analysis of Likert-scale data: a reinterpretation of Gregoire and Driver », *Psychological bulletin*, vol. 105, no1, pp. 167-170, 1989

[Rensink et al., 1997] Rensink R. A., O'Regan K., Clark, « To see or not to see: the need for attention to perceive changes in scenes », *Psychological Science*, 8, pp.368-373, 1997

[Roudaut et al., 2002] Roudaut G., Dacremont C., Vallès Pàmies B., Colas B., Le Meste M., « Crispness: a critical review on sensory and material science approaches », *Trends in Food Science & Technology*, Volume 13, Issues 6-7, pp. 217-227, 2002

[Rousseau, 2002] Rousseau J., « L'analyse sensorielle du raisin : les caractéristiques du grenache en région rhodanienne », *Guide de la Vinification Rhodanienne*, 2002

S

[Sangsue et al., 2005] Sangsue J., Siegwart H., Cosnier J., Cornu J. & Scherer K. R., « Développement d'un questionnaire d'évaluation subjective de la qualité de la voix et de la parole (QEV) », 2005

[Sauvageot et al., 2005] Sauvageot F., Urdapilleta I., Peyron D., « Within and between variations of texts elicited from nine wine experts », *Food Quality and Preference*, In Press, Corrected Proof, 2005

[SSHA, 1998] Soc. Sci. d'Hygiène Alimentaire, Evaluation Sensorielle, *Manuel Méthodologique., Techniques et Documentation*, Lavoisier, Paris, 1998

[Stevens, 1964] Stevens S., « Concerning the psychophysical power law », *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 16, pp. 383-385, 1964

[Sweet et al., 2005] Sweet A. L., Tjokrodjojo S., Wijaya P., « An Investigation of the Measurements Systems Analysis "Analytic Method" for Attribute Gages », *Quality Engeneering*, 17, pp. 219-226, 2005

T

[Taguchi, 1987] Taguchi G., « System of Experimental Design: Engineering Methods to Optimize Quality and Minimize Costs », *American Supplier Institute*, 1987

V

[Villarino et al., 2006] Villarino Blanca J., Dy Lianne Marsha, Lizada Ma. Concepcion C., « Descriptive sensory evaluation of virgin coconut oil and refined, bleached and deodorized coconut oil », *LWT, Food Science and Technology*, 2006.

W

[Weller et al., 2002] Weller J.-N., Stanton K.J., 2002, « The establishment and use of a QC analytic/descriptive/consumer measurement model for the routine evaluation of products at manufacturing facilities », *Food Quality and Preference*, 13, pp. 375-383, 2002

[Wheeler et al., 1989] Wheeler D. J., Lyday R. W., *Evaluating the Measurement Process*, Second Edition. SPC Press, Inc, 1989

[Windsor, 2003] Windsor S. E., « Attribute Gage R&R », *Delta Sigma Solutions LLC, Six Sigma Forum Magazine*, pp. 23-28, 2003

Annexes

Annexe 1

Présentation de l'entreprise Patek Philippe SA

1 QUELQUES DATES...

12 juin 1812 : Naissance d'Antoni Norbert Patek de Prawdzik en Pologne. Il fit une carrière militaire durant l'insurrection polonaise mais suite à l'échec de celle-ci dû, comme des milliers d'autres soldats polonais, fuirent le régime russe. Il émigra vers l'Allemagne, pays frontalier, puis jusqu'en France où il trouva d'abord refuge à Cahors, puis à Amiens pour s'installer à Genève.

1er mai 1839 : Antoni Norbert Patek de Prawdzik et François Csapek, ce dernier horloger de métier, s'associent pour fonder "*Patek, Czapek & Cie*".

1843 : Antoine Norbert de Patek obtient la nationalité suisse.

1844 : Rencontre avec l'horloger français Adrien Philippe à Paris où ce dernier lui présente son invention avant-gardiste de remontage et de réglage de l'heure via la couronne.

1845 : Patek entreprend de quitter la compagnie et de continuer son activité seul. La compagnie devient "*Patek & Cie*".

1851 : Il s'associe ensuite avec Adrien Philippe et la compagnie porte le nom de "*Patek Philippe & Cie*".

1er mars 1877 : Antoine Norbert de Patek décède à Genève.

1901 : le nom devient "*Ancienne Manufacture d'Horlogerie Patek Philippe & Cie, S.A.*".

La compagnie est achetée par Charles et Jean Stern et est depuis une entreprise de famille, avec à sa tête une troisième et quatrième génération, Philippe Stern le Président et Thierry Stern son fils, Vice-Président.

2 LES PRODUITS PATEK PHILIPPE

Patek Philippe est en tout premier lieu une manufacture horlogère et par conséquent, ses principaux produits vendus sont des montres.

2.1 LES MONTRES

Le panel proposé est à l'échelle de la marque proposant à la fois des montres quartz, manuelles mécaniques, manuelles automatiques.

La gamme des produits est lors très large.

Patek Philippe est une manufacture horlogère cherchant sans cesse à innover. En effet, en analysant l'ensemble de sa gamme, nous pouvons voir la diversité des produits. Ces produits peuvent répondre à différentes fonctions (Figure 78) :

- indication du calendrier (jour de la semaine, date, mois)
- passage automatique du calendrier du 30 au 1^{er} ou du 31 au 1^{er} suivant les mois de l'année
- passage automatique du calendrier du 28 février au 1^{er} ou du 29 février au 1^{er} suivant l'année
- sonnerie des quarts d'heure, demie heure et heure
- ...



Figure 78 : Une gamme riche en modèle et en complication

Le panel de ces fonctions est considérable ce qui permet de répondre entièrement aux exigences clients et d'essayer de les satisfaire entièrement.

En plus, de cette obsession d'être parfait techniquement, Patek Philippe décline ses produits selon différents modèles, laissant le client choisir selon ses propres goûts. Le client pourra donc choisir dans un véritable registre :

- la couleur de sa montre (bracelet, cadran...) (Figure 79)



Figure 79 : Une référence de montre déclinée en plusieurs modèles suivant la couleur du cadran et du bracelet

- le niveau de sertissage de la boîte, du bracelet ... (peu serti ou entièrement serti)
- ...

2.2 LES COMPOSANTS

Aussi, garant de ce savoir faire indiscutable, Patek Philippe produit l'ensemble des pièces nécessaires pour l'élaboration d'une montre ou dans quelques cas accompagne ses fournisseurs pour la production de certaines pièces. Patek Philippe est donc capable de produire l'ensemble des composants pour réaliser une montre ce qui lui permet d'étendre son art et sa gamme de produit encore un peu plus. (Figure 80)



Figure 80 : Un nombre de composants importants

2.3 UNE DIVERSITE IMPORTANTE ...

Bien que Patek Philippe soit une référence en terme de montre, son art ne s'arrête pas là. Dérivées des montres mais néanmoins faisant partie de la gamme horlogère, Patek Philippe possède un savoir faire indiscutable pour réaliser des pièces considérées par les plus grands collectionneurs comme des pièces sans précédent telles que des montres de poche ou des pendulettes. Ces pièces bien souvent uniques par leur procédé d'obtention, comme par exemple des dessins réalisés sur la nacre, sont d'une qualité et d'une précision indéfinissable.

Et pour finir, Patek Philippe répondant en quelques sortes à une demande de ces clients proposent aussi une gamme de bagues, de boutonsnières... déclinées suivant les références des montres afin de donner l'opportunité à ces clients d'avoir en quelques sortes une parure : montre et accessoires.

3 UNE IMAGE DE MARQUE A DEFENDRE

Patek Philippe fait partie de ses marques de prestige qui font d'un objet une œuvre d'art. Considérés comme l'une des plus prestigieuses manufactures horlogères au monde, le nom Patek Philippe dans le domaine de horlogers reste très convoité et est synonyme de référence tant au niveau technique qu'esthétique.

Cette notoriété fait de la manufacture Patek Philippe une société de réputation internationale et un gage de qualité et de performance bien supérieur aux autres manufactures horlogères. Patek Philippe recherche donc la perfection dans l'ensemble de la gamme de ses produits. Cette recherche de perfection passe bien évidemment par la connaissance parfaite des exigences de ces clients. Patek Philippe sait ce que veulent ces clients et se met en quatre pour y répondre.

Le mot d'ordre pourrait donc être : *" Rien est trop beau pour le client "*

Annexe 2

Les différentes épreuves de l'Analyse Sensorielle

1 EPREUVES DISCRIMINATIVES

	Domaine d'application	Questionnaire	Procédure expérimentale						Interprétation Statistique
			Sujets		Echantillons				
			Type	Nbre par groupe	Nbre par groupe	Présentation	Répétition	Ordre de présentation	
Epreuve d'appariement	Déterminer les proximités entre ≠ produits Situer la production d'un fabricant / la concurrence	Apparier un échantillon à un témoin	naïfs	/	/	Simultanément les échantillons et les témoins	Plusieurs fois chaque échantillon	Aléatoire, variable suivant les sujets	χ''
Epreuve triangulaire	Détecter ou non les différences entre 2 produits	3 échantillons dont 2 identiques, retrouver les 2 identiques	naïfs	/	/	les 3 simultanément	Oui, un même nombre de fois	Modifié à chaque présentation de 3 échantillons	Loi binomiale p = 1/3 test unilatéral
Epreuve duo-trio	Adapter au contrôle qualité, mise en évidence des faibles variations dans une production	1 témoin identifié, 2 échantillons, retrouver l'échantillon qui est identique au témoin	naïfs	/	/	Témoin constant toute l'épreuve ou témoin variant soit l'un ou l'autre des échantillons	non	Simultanément	Loi binomiale p = 1/2 test unilatéral
Epreuve A-non A	Adapter au contrôle qualité, cas où le témoin représente la norme Conseiller dans le cas de petite différence d'aspect car les échantillons ne sont pas visibles en même temps	1 témoin mémorisé au début de l'épreuve, identifier ou non l'échantillon présenté comme différent ou non	/	/	/	Un par un	Le témoin comme les différents échantillons doivent être présentés un même nombre de fois répartis aléatoirement par sujet	Aléatoire, variable suivant les sujets	χ''
Epreuve p parmi n	Réserver quand la comparaison de nombreux produits de pose pas de problème, exemple comparaison visuelle	n échantillons présentés, repartie en p groupes identiques, l'un de p et l'autre de n-p	naïfs	/	/	les n simultanément	Oui, un même nombre de fois	Modifié à chaque présentation	Loi binomiale p = 1/ C_p^n test unilatéral

2 EPREUVES DESCRIPTIVES

				Procédure expérimentale						
				Sujets		Echantillons				
		Domaine d'application	Questionnaire	Type	Nbre par groupe	Nbre par groupe	Présentation	Répétition	Ordre de présentation	Interprétation Statistique
Epreuve de classement		Utiliser quand il est suspecté une différence sensorielle entre certains échantillons mais ne sachant pas quels sont les échantillons à remettre en cause	Ranger les échantillons présentés par ordre d'intensité sur l'échelle proposée	Naïfs	/	Cela dépend de sa nature	Simultanément	Non	Aléatoire quand il s'agit de comparaison visuelle	Test de Friedman Test de Fisher
Evaluation d'une grandeur sensorielle simple	Epreuve de cotation	Utiliser dans le cas d'une échelle ordonnée pour une caractéristique	Indiquer à quelle classe, l'échantillon présenté appartient	naïfs	/	Peu	Successivement	Non	/	χ^2
	Epreuve d'intervalle	Utiliser dans le cas d'une échelle structurés ou non pour une caractéristique	Indiquer à quel niveau sur l'échelle, l'échantillon présenté appartient	entraînés	/	Peu	Simultanément	Non	/	Analyse de la variance Test de Student...
	Epreuve de rapport		Donner une valeur sur la caractéristique mesurée de l'échantillon et après faire de même pour les échantillons présentés en fonction de la note donnée au témoin	/	/	Peu	Successivement	Non	/	Transformation logarithmique ou autre pour standardiser les échelles des sujets, analyse de la variance (test de Fisher)...

		Domaine d'application	Questionnaire	Procédure expérimentale						Interprétation Statistique
				Sujets		Echantillons				
				Type	Nbre par groupe	Nbre par groupe	Présentation	Répétition	Ordre de présentation	
Evaluation d'une grandeur sensorielle complexe	Profil conventionnel	Dès qu'on s'intéresse à une grandeur sensorielle complexe ne pouvant être mesurées par instrumentation tel que la texture, l'arôme... Utiles pour la mise en place de produit et pour le suivi de produits fabriqués	Evaluer les descripteurs donnés pour chaque échantillon sur une échelle d'intensité	entraînés	≈51	Au maxi 5	Simultanément ou Successivement	Oui	Aléatoire et différent pour chaque sujet	Test de Student
	Profil avec libre choix du vocabulaire	Utiliser pour obtenir une carte sensorielle du produit	Les descripteurs sont définis pour chaque sujet à la première séance, donc chaque sujet a son propre questionnaire	entraînés	/	/	Monadique	Oui	Aléatoire et différent pour chaque sujet	Méthode STATIS Analyse procustéenne généralisée

		Domaine d'application	Questionnaire	Procédure expérimentale						Interprétation Statistique
				Sujets		Echantillons				
				Type	Nbre par groupe	Nbre par groupe	Présentation	Répétition	Ordre de présentation	
Méthodes non verbales	Les mesures de similitudes	Utiliser pour obtenir une carte sensorielle du produit	Indiquer leur degré de ressemblance sur une échelle continue ou discontinues	Peu entraînés			2 à 2	Oui, en changeant de pair	Aléatoire et différent pour chaque sujet	Méthodes de Multidimensional Scaling
	La méthode de tri	Utiliser pour obtenir une carte sensorielle du produit	Trier les échantillons selon un nombre non fixé de groupes selon leur similitude	Non entraînés	/	Au maxi 20	Simultanément ou selon un carré latin de Williams*	Oui	Aléatoire et différent pour chaque sujet	Méthodes de Multidimensional Scaling

	Domaine d'application	Questionnaire	Procédure expérimentale						Interprétation Statistique
			Sujets		Echantillons				
			Type	Nbre par groupe	Nbre par groupe	Présentation	Répétition	Ordre de présentation	
Epreuve par paire	Pour exprimer sa préférence entre 2 produits	Exprimer son avis entre 2 produits		important	Minimum 4 ou 5	2 par 2	Inversé le 2 par 2	Aléatoire, variable suivant les sujets	
Epreuve de classement	Classer les échantillons sur leur caractère agréable	Ranger les échantillons présentés sur le critère agréable sur l'échelle proposée	Naïfs	/	Cela dépend de sa nature	Simultanément	Non	Aléatoire quand il s'agit de comparaison visuelle	Test de Friedman Test de Fisher
Evaluation hédonique	Quand aucun standard bien connu n'est disponible sur le critère agréable du produit	Exprimer son avis sur une échelle déterminée pour le critère agréable ou une échelle d'intervalle	Naïfs ou expérimentés	>36	<20	monadique	Les 2 premiers sont répétés à la fin	Aléatoire, variable suivant les sujets	/
Epreuve de lassitude	Prédire l'apparition d'une lassitude	Evaluer 15 échantillons mais tous identiques	Consommateurs ou potentiels consommateurs	>24	/	1 par 1	Non	Aléatoire	Test de Friedman
	Applicable sur des produits homogènes	Regarder l'écart type d'appréciation pour chaque sujet							Test de Kruskal et Wallis...
Epreuve d'aversion	Prédire l'apparition d'une aversion	Estimer par chaque sujet, le poids du produit qu'il a mangé, comparé au poids réel mangé	Consommateurs ou potentiels consommateurs	[36 ; 60]	/	1 par 1	Non	1 petite quantité (1/5) 1 grosse portion (1,5) 1 grosse portion (1,5) 1 petite quantité (1/5)	Test de Friedman Test de Kruskal et Wallis...

3 EPREUVES HEDONIQUES

	Domaine d'application	Questionnaire	Procédure expérimentale						Interprétation Statistique
			Sujets		Echantillons				
			Type	Nbre par groupe	Nbre par groupe	Présentation	Répétition	Ordre de présentation	
Epreuve d'authenticité	Produits des produits de type diététique ou faiblement alcoolisé afin de comparer avec le produit réel	Dire s'il s'agit du produit authentique ou non	Personnes n'utilisant pas souvent le produit	<36	grand de 15 à 30	/	3 fois pour chaque variante	Aléatoire	Test binomial
Epreuve de consommation	Etudier le comportement de consommation	Regarder le comportement du sujet (à qui on a donné des tickets de consommation) en regardant sa consommation	/	/	1	Les sujets vont se servir quand ils veulent	Oui	/	Courbes temps-fréquence Table de contingence
Epreuve monadique	Pour évaluer l'acceptabilité dans une situation à domicile	Produits distribués aux familles, utilisés pendant un temps donné	Consommateurs ou potentiels consommateurs	>200	1	Produits distribués aux familles	Oui	/	/
Méthode de l'agenda et mesure de consommation	Utiliser pour des produits régulièrement utilisés Etudier plus précisément le comportement de consommation	Produits distribués aux familles, utilisés pendant un temps donné en notant quand et le poids consommés	Consommateurs ou potentiels consommateurs	/	/	Produits distribués aux familles	Oui	/	/

	Domaine d'application	Questionnaire	Procédure expérimentale						Interprétation Statistique
			Sujets		Echantillons				
			Type	Nbre par groupe	Nbre par groupe	Présentation	Répétition	Ordre de présentation	
La notation par rapport à l'idéal	Permettre de rechercher pour chaque sujet interrogé le niveau idéal d'une caractéristique sensorielle	Evaluer la caractéristique souhaitée sur une échelle continue ou discontinue	Consommateurs habituels <						

Annexe 3

Outils statistiques de l'analyse sensorielle

Cette annexe a pour objectif de faire un rappel (non exhaustif) sur les diverses outils d'analyse de données étant les plus couramment utilisés en Analyse Sensorielle [De Lagarde, 2000] [Foucart, 1997]

1 LES STATISTIQUES DESCRIPTIVES

1.1 LES METHODES FACTORIELLES

Les méthodes factorielles ont pour objectif de visualiser, et plus généralement, de traiter des données multidimensionnelles regroupant généralement un grand nombre de variables. La prise en compte de ces variables est souvent redondante et toutes ces méthodes exploitent cette caractéristique pour remplacer les variables initiales par un nombre réduit de nouvelles variables tout en minimisant la perte d'information. [Cibois, 2000]

1.1.1 L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES (ACP)

✱ *Objectif d'une ACP*

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est utilisée lorsque les variables travaillées sont des variables quantitatives. Elle s'opère à partir de la description des données contenues dans un tableau individus / caractères numériques (p caractères mesurés sur n individus d'une population complète ou d'un échantillon de cette population). Les variables descriptives de la population sont synthétisées en composantes principales et le positionnement des individus par rapport à ces composantes principales aide à mettre en évidence des typologies d'individus, ainsi que les variables qui ont amené à la création de ces types. Le principe de cette méthode est de mettre tous les nuages de points obtenus par ces variables dans un cube à n dimensions centré sur l'origine. L'ACP va donc permettre de trouver un nouveau système d'axes permettant de décrire les dimensions du nuage dans la meilleure des configurations. Ainsi, l'ACP contribue à montrer les associations ou oppositions entre certaines variables, ainsi que montrer les individus présentant des caractéristiques communes ou antagonistes.

✱ Principe d'une ACP

Lorsqu'il n'y a que deux variables x^1 et x^2 pour caractériser les individus d'une population, il est facile de représenter ceux-ci sur un graphique plan. Chaque individu e_i est représenté par un point à deux coordonnées (x_i^1, x_i^2) et la simple observation de l'allure du nuage permet d'étudier l'intensité de la liaison entre les variables et de repérer les individus ou groupes d'individus présentant des caractéristiques voisines. Mais dès que variables explicatives sont plus nombreuses, l'interprétation graphique devient difficile, voire impossible, à réaliser. L'analyse en composantes principales propose donc de réaliser une projection de l'ensemble des données sur un plan, appelé plan principal. Ce plan est choisi de manière à conserver du mieux possible les distances initiales entre les individus. Pour cela, la méthode fixe pour critère de rendre maximale la moyenne des carrés des distances entre les projections f_1, f_2, \dots, f_n des individus e_1, e_2, \dots, e_n .

Pour déterminer le plan principal, il suffit de trouver deux droites Δ_1 et Δ_2 . Si Δ_1 et Δ_2 sont perpendiculaires, on a :

$$d^2(f_i, f_j) = d^2(\alpha_i, \alpha_j) + d^2(\beta_i, \beta_j) \quad \text{Équation 65}$$

où les α_i et β_i sont les projections de e_i respectivement sur Δ_1 et Δ_2 .

La méthode consiste alors à chercher tout d'abord Δ_1 , rendant maximale la moyenne des $d^2(\alpha_i, \alpha_j)$ puis Δ_2 perpendiculaire à Δ_1 , rendant maximale la moyenne des $d^2(\beta_i, \beta_j)$. La méthode peut alors se poursuivre en dehors du plan en déterminant des droites $\Delta_3, \Delta_4, \dots, \Delta_p$ perpendiculaires entre elles, chaque Δ_i représentant un axe principal du nuage. Par projection sur ces axes principaux, chaque individu e_i qui avait pour coordonnées initiales $(x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^p)$ obtient de nouvelles coordonnées $(c_i^1, c_i^2, \dots, c_i^p)$.

Les nouvelles variables (c^1, c^2, \dots, c^p) ainsi construites sont appelées composantes principales, et chaque composante c^k , qui n'est autre que la liste des coordonnées des n individus sur l'axe Δ_k , est une combinaison linéaire des caractères initiaux :

$$c^k = u_1^k x^1 + u_2^k x^2 + \dots + u_p^k x^p \quad \text{Équation 66}$$

où les coefficients $(u_1^k, u_2^k, \dots, u_p^k)$ formant le k ème facteur principal u^k .

La meilleure représentation des données au moyen de q caractères seulement ($q < p$) s'obtient alors en prenant les q premières composantes principales.

L'ACP est donc une méthode de réduction du nombre de caractères permettant des représentations géométriques des individus et des variables les caractérisant. C'est une méthode factorielle car cette réduction ne s'effectue pas par une simple sélection de certains caractères existants, mais par la construction de nouveaux caractères obtenus en combinant les caractères initiaux au moyen des "facteurs".

✱ Interprétation des résultats d'une ACP

La principale difficulté d'une ACP réside dans l'interprétation des résultats obtenus. En effet, quelle signification peut-on donner à des caractères qui sont des combinaisons des caractères initiaux ? Pour fiabiliser les interprétations, il est nécessaire d'utiliser une représentation dans laquelle chaque caractère est représenté par un point dont les

coordonnées sont ses corrélations avec \mathbf{c}_1 et \mathbf{c}_2 . Les caractères initiaux s'inscrivent alors à l'intérieur d'un cercle de rayon 1, appelé cercle des corrélations, avec :

$$r^2(\mathbf{c}^1; \mathbf{x}^j) + r^2(\mathbf{c}^2; \mathbf{x}^j) \leq 1 \quad \text{Équation 67}$$

Ce cercle permet de repérer rapidement les caractères dont les valeurs sont corrélées sur l'ensemble des individus d'une population donnée.

L'interprétation du cercle obtenu s'effectue de la manière suivante :

- deux caractères sont positivement corrélés si leurs lignes sont proches, négativement corrélés si leurs lignes ont des directions opposées, et non corrélés si leurs lignes forment un angle droit.
- à la condition qu'ils soient proches de la circonférence du cercle, deux individus ont des caractéristiques semblables s'ils sont proches l'un de l'autre et ont des caractéristiques totalement différentes s'ils occupent des positions opposées le long de l'un des axes de la représentation.

Dans les deux cas, l'interprétation n'est valable que si les deux axes principaux expliquent une variation des données suffisante.

1.1.2 L'ANALYSE FACTORIELLE DES CORRESPONDANCES (AFC)

✧ *Objectif d'une AFC*

L'analyse factorielle des correspondances est une méthode qui permet d'analyser des tableaux de contingence regroupant l'ensemble de la population sur les modalités de leurs réponses à deux questions qualitatives. Une AFC s'applique donc à des variables qualitatives.

✧ *Principe d'une AFC*

Le principe d'une AFC est très similaire à celle d'une ACP. Elle s'en distingue cependant par plusieurs particularités.

D'abord, l'AFC permet une représentation simultanée des variables et des individus. Elle permet ainsi de repérer directement les affinités entre ces individus et ces variables.

Ensuite, les images des nuages d' "individus-lignes" et d' "individus-colonnes" de départ sont représentées de telle façon que les distances entre images soient des distances euclidiennes (Équation 68)

$$d_{x^2}^2(L_i, L_k) = \sum_{j=1}^p \frac{n_{++}}{n_{+j}} \left(\frac{n_{ij}}{n_{i+}} - \frac{n_{kj}}{n_{k+}} \right)^2 \quad \text{Équation 68}$$

Avec n_{ij} = somme des éléments de la ligne i
 n_{+j} = somme des éléments de la colonne j
 n_{++} = somme des éléments du tableau

Contrairement à une ACP, l'AFC permet de pondérer certains points.

Si, comme une ACP, l'AFC permet de regrouper les produits ayant des similitudes, la méthode permet cependant de mettre en évidence certains points particuliers sur le graphique

✧ *Interprétation des résultats d'une AFC*

Lors d'une évaluation sensorielle, l'AFC permet d'afficher à la fois les produits évalués et les descripteurs cités. Les produits seront alors regroupés en fonction de leurs caractéristiques

proches et de leurs caractéristiques cités semblables. La disposition des modalités de chaque variable les unes par rapport aux autres aide à donner un sens à chaque axe.

1.1.3 L'ANALYSE FACTORIELLE DISCRIMINANTE (AFD)

✖ *Objectif d'une AFD*

Les méthodes discriminantes regroupent l'ensemble de méthodes qui ont pour objectif d'étudier les liens qui peuvent exister entre une variable qualitative, appelée *variable à expliquer*, et plusieurs variables quantitatives ou qualitatives, appelées *variables explicatives* ou descripteurs.

L'objectif d'une AFD est donc de construire, à partir des variables explicatives initiales, un nombre réduit de nouvelles variables discriminant au mieux les classes. Elle peut donc être vue comme une ACP sur les points moyens des différents groupes mais en tenant compte de la dispersion des individus de chaque groupe. Mais elle peut être aussi vue comme une analyse de variance multidimensionnelle à un seul facteur.

✖ *Principe d'une AFD*

Les n individus ou observations sont décrits par un ensemble de p variables (x_1, x_2, \dots, x_p) et répartis en q classes définies a priori par la variable y nominale à q modalités. Une AFD va permettre tout d'abord de séparer au mieux les q classes à l'aide des p variables explicatives en recherchant les combinaisons linéaires adéquates. Elle va ensuite permettre de résoudre l'affectation de nouveaux individus à ces classes construites.

La première combinaison linéaire est celle où la variance entre les classes est maximale, et cela afin de séparer au mieux les classes, et où la variance entre les variables est minimale à l'intérieur des classes pour limiter l'étendue de chaque classe. Les autres combinaisons linéaires sont celles qui discriminent le mieux les classes sans qu'elles soient corrélées avec la première.

Nous désignons par $a(i)$ la valeur pour l'individu i , d'une combinaison linéaire a des p variables préalablement centrées (Équation 69) :

$$a(i) = \sum_{j=1}^p a_j (x_{ij} - \overline{x_j}) \quad \text{Équation 69}$$

Cette valeur se décompose en variance intra classes et en variance interclasses. Aussi, étant donné que l'objectif est de minorer la variance intra classes et de majorer la variance interclasses, il s'agit donc de chercher la projection sur l'axe discriminant a , de telle manière à ce que chaque sous-nuage soit bien regroupé et bien séparé des autres sous nuages.

✖ *Interprétation des résultats d'une AFD*

L'analyse discriminante est donc plus performante que l'ACP lorsqu'il s'agit d'expliquer les différences entre les groupes car la méthode est essentiellement basée sur la séparation des individus par groupe. Aussi, par projection des groupes sur les axes principaux, ces derniers seront bien distincts. De plus, grâce à la signification des axes, l'explication du groupement des individus pourra se faire.

1.2 LA CLASSIFICATION AUTOMATIQUE (CA)

✖ *Objectif d'une CA*

Comme toute méthode d'analyse de données, la Classification Automatique, a pour but d'obtenir une représentation simplifiée des données initiales. Il s'agit donc également d'une

méthode de réduction des données. La classification désigne quant à elle l'organisation d'un ensemble de classes homogènes.

✖ *Principe d'une CA*

Pour définir des classes homogènes et donc réaliser une classification automatique, on utilise le plus souvent une mesure de similarité. Cela revient à rechercher l'obtention de classes telles que deux points d'une même classe se ressemblent plus que deux points issus de deux classes différentes. La dissimilarité entre les points est notée d et le choix de l'agrégation pour tracer le diagramme, tel qu'un dendrogramme par exemple, revient à l'expérimentateur.

Plusieurs méthodes d'agrégation de deux groupes A et B sont possibles. Par exemple :

- le lien minimum : $\delta(A, B) = \min\{d(a, b), a \in A, b \in B\}$
- le lien maximum : $\delta(A, B) = \max\{d(a, b), a \in A, b \in B\}$
- la distance des centres de gravité : $\delta(A, B) = d(g_a, g_b)$

La Figure 81 montre par exemple le dendrogramme obtenu pour représenter graphiquement les groupes déterminés par l'analyse.

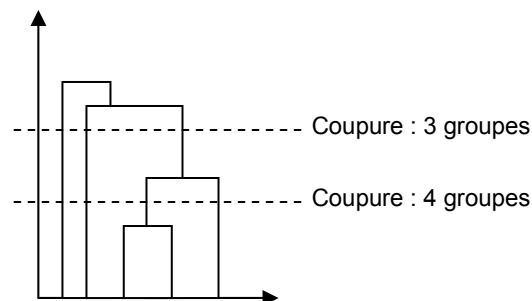


Figure 81 : Schéma d'un dendrogramme

✖ *Interprétation des résultats d'une classification automatique*

A la lecture du dendrogramme ou de toute autre représentation graphique d'une classification automatique, les groupes apparaissent naturellement. Dans le cas du dendrogramme, il suffit de couper le diagramme à un endroit donné pour avoir différents groupes partageant une même similitude à ce même endroit. Aussi chaque coupe à différents endroits modifiera les groupes et leurs similitudes.

2 LES STATISTIQUES INFÉRENTIELLES

Dans le cas de variables aléatoires non maîtrisables (subjectivité de personnes pour diverses raisons : humeur, fatigue, ...), les statistiques dites inférentielles sont utiles. Ces dernières sont souvent basées sur des échantillons d'une population et sur des estimations de certains paramètres inconnus.

Ces variables doivent répondre à des conditions d'application pour que les différentes méthodes décrites dans ce paragraphe puissent être utilisées. Ces variables observées doivent ainsi être indépendantes et identiquement distribuées selon une distribution théorique comme, par exemple, une distribution gaussienne. Par conséquent, l'hypothèse de cette distribution théorique doit être prouvée par un test d'ajustement comme, par exemple, le test du χ^2 , le test de Kolmogorov Smirnov, ... ou, plus graphiquement, la droite d'Henry lorsqu'il s'agit de démontrer une distribution gaussienne.

2.1 LES INTERVALLES DE CONFIANCES (IT)

✖ *Objectif d'un IT*

L'utilisation d'un IT va permettre de valider ou non la similarité d'échantillons ou de sujets à partir des données obtenues lors d'une expérimentation. Il s'agit alors de comparer les résultats de chacun des échantillons ou sujets et d'en tirer les conclusions adéquates.

✱ *Principe d'un IT*

A partir des variables aléatoires x_1, x_2, \dots, x_n caractérisant la population étudiée et obtenues par expérimentations, il est aisé de calculer les caractéristiques de la distribution théorique. Ces caractéristiques incluent :
la moyenne,

$$\bar{x}_k = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \text{Équation 70}$$

et l'écart type,

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_k)^2}{n-1}} \quad \text{Équation 71}$$

✱ *Interprétation des résultats obtenus par IT*

Grâce aux IT, il est possible de comparer les données d'un échantillon à une valeur cible mais aussi d'affirmer ou d'infirmer que deux échantillons sont significativement différents ou pas. Dans le cas de deux échantillons dits différents, leurs IT ne se chevauchent pas.

En analyse sensorielle, il est utopique de penser que comparer des échantillons reviendrait à comparer la moyenne et l'écart type de leurs propres distributions. Etant donnée la variabilité probable des résultats d'une évaluation subjective, les intervalles de confiance sur la moyenne sont :

- lorsque σ^2 est connue : utilisation de la loi normale centrée réduite

$$\bar{x} - u_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq m \leq \bar{x} + u_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{Équation 72}$$

- lorsque σ^2 est inconnue : utilisation de la loi de Student

$$\bar{x} - t_{1-\frac{\alpha}{2}}(v) \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq m \leq \bar{x} + t_{1-\frac{\alpha}{2}}(v) \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{Équation 73}$$

2.2 LES TESTS D'HYPOTHESE

✱ *Objectif de la méthode*

Dans le cas de tests d'hypothèse, les statistiques décisionnelles ont pour objectif d'accepter ou de refuser l'hypothèse émise au départ avec un niveau de confiance donnée. Ce niveau de confiance doit être évalué par l'expérimentateur avant le test car deux risques d'erreur sont possibles :

- celui de rejeter une hypothèse juste nommée risque de première espèce noté α : en analyse sensorielle, ce risque est en fait le risque de considérer que les produits sont différents alors qu'ils ne le sont pas.
- celui d'accepter une hypothèse fautive nommée risque de seconde espèce noté β : en analyse sensorielle, ce risque est en fait le risque de considérer que les produits ne sont pas différents alors qu'ils le sont.

✖ *Principe de la méthode*

La méthode est donc de poser une hypothèse de départ H_0 avec sa contre hypothèse H_1 et de vérifier par un test statistique adéquat (selon les données disponibles) sa validité ou non. Le test d'hypothèse sera donc réalisé sur la différence entre les deux échantillons. Cette différence est notée d et se calcule de la manière suivante :

$$d_i = x_{i1} - x_{i2} \quad \text{Équation 74}$$

avec

x_{i1} : les variables aléatoires de l'échantillon 1

x_{i2} : les variables aléatoires de l'échantillon 2

$i \in [1, n]$: nombre de mesure de chacun échantillon

Les nouvelles variables aléatoires de la population sont donc : d_1, d_2, \dots, d_n ce qui permet de calculer les caractéristiques de la distribution en question : la moyenne,

$$\bar{d}_k = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad \text{Équation 75}$$

et l'écart type,

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d}_k)^2}{n-1}} \quad \text{Équation 76}$$

Aussi, si les échantillons sont de taille identique (appelés échantillons appariés) soit n , on utilise la loi de Student en calculant :

$$t = \frac{\bar{d}}{\sigma / \sqrt{n}} \quad \text{Équation 77}$$

Et en cherchant sur la variable tabulée de Student (test bilatéral) : $t_{n-1, 1-\alpha/2}$

Aussi, si l'inéquation suivant est juste, l'hypothèse de départ est vraie.

$$-t_{n-1, 1-\alpha/2} \leq t \leq t_{n-1, 1-\alpha/2} \quad \text{Équation 78}$$

Remarque : En analyse sensorielle, les échantillons sont très souvent des échantillons appariés car les produits testés sont tous testés par tous les sujets.

✖ *Interprétation des résultats obtenus par tests d'hypothèse*

Le plus souvent, l'hypothèse de départ en analyse sensorielle est de considérer que les échantillons sont similaires. Aussi, si le test est dit significatif - c'est-à-dire que les résultats amènent à rejeter l'hypothèse de départ - cela revient à affirmer que les échantillons sont significativement différents au risque d'erreur voulu.

2.3 L'ANALYSE DE LA VARIANCE

✖ *Objectif de la méthode*

L'analyse de la variance est l'étude de l'effet de variables qualitatives sur une variable quantitative.

Le vocabulaire utilisé est particulier : les variables qualitatives sont appelés des facteurs et leurs modalités niveaux.

✱ *Principe de la méthode*

Pour chaque réalisation A_i ($i=1\dots k$) d'un facteur A , on dispose d'un échantillon $x_i^1, \dots, x_i^{n_i}$ dont la moyenne est $\overline{x_i}$. La taille totale de la population est donc $n = \sum_i n_i$.

On considère que chaque échantillon est issu d'une variable aléatoire X_i suivant une loi $N[m_i, \sigma_i]$. En terme de test, nous avons donc

$$H_0 : m_1 = m_2 = \dots = m_k = m$$

$$H_1 : \exists i, j \quad m_i \neq m_j$$

On pose $x_i^j = m_i + \epsilon_i^j$ où ϵ_i^j est une perturbation dont la variation obéit à une variable aléatoire normale centrée et d'écart type σ . On peut aussi adopter un modèle similaire mais plus général de la forme $x_i^j = \mu + \alpha_i + \epsilon_i^j$ où μ est une valeur moyenne constante et α_i l'effet du niveau i du facteur explicatif.

Dans le cas où l'hypothèse H_0 est rejetée, l'étude se poursuit par l'estimation des valeurs moyennes m_i (ou μ et α_i selon le modèle utilisé).

On note \overline{X} la moyenne totale que l'on obtient par

$$\overline{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} x_i^j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k n_i \overline{X_i} \quad \text{Équation 79}$$

La variance totale S_T^2 est estimée par

$$S_T^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_i^j - \overline{X})^2 \quad \text{Équation 80}$$

On montre facilement que cette variance totale peut se décomposer en la somme de la variance des moyennes, S_A^2 (aussi appelée variance inter-classes) plus la moyenne des variances, S_R^2 (aussi appelée variance intra-classes).

$$S_T^2 = S_A^2 + S_R^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k n_i (\overline{X_i} - \overline{X})^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_i^j - \overline{X_i})^2 \quad \text{Équation 81}$$

La variance S_A^2 représente la variation du au facteur explicatif A , la variance S_R^2 est elle considérée comme la variabilité résiduelle.

On peut réécrire cette variance résiduelle en faisant intervenir les variances de chaque échantillon :

$$S_R^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k n_i S_i^2 \quad \text{Équation 82}$$

Chaque quantité $\frac{n_i S_i^2}{\sigma}$ suit une loi du χ^2 à $n_i - 1$ degrés de liberté. Donc la quantité

$\frac{n S_R^2}{\sigma}$ suit également une loi du χ^2 à $\frac{n-k}{X_i}$ degrés de liberté.

Sous l'hypothèse H_0 , les variables aléatoires X_i sont de même loi donc on a également le fait que la quantité $\frac{n S^2}{\sigma}$ suit une loi du χ^2 à $n - 1$ degrés de liberté, et $\frac{n S_A^2}{\sigma}$, une loi du χ^2 à $k - 1$ degrés de liberté.

On peut donc construire l'indicateur de notre test par

$$F(k-1, n-k) = \frac{\frac{S_A^2}{k-1}}{\frac{S_R^2}{n-k}} \quad \text{Équation 83}$$

Dont la loi est celle de Fisher-Snedecor.

✱ *Interprétation des résultats obtenus par analyse de la variance*

Si la valeur de l'indicateur est supérieure à la valeur critique d'une variable de Fisher-Snedecor (pour une erreur de première espèce α), alors on conclut à l'influence du facteur explicatif A, i.e. on rejette l'hypothèse H_0 .

Résumé

La thèse réalisée dans le cadre d'une coopération entre l'Université de Savoie et une grande manufacture horlogère traite du problème de la maîtrise de la qualité visuelle des produits manufacturés de haute qualité. Nous faisons l'hypothèse que la maîtrise de cette qualité passera encore pour de nombreuses années par un contrôle visuel des produits. Le travail présenté dans cette thèse propose ainsi les bases d'un modèle métrologique sensoriel formalisant le contrôle visuel. Ce travail repose sur les démarches d'analyse sensorielle.

Le premier chapitre présente une étude bibliographique des différents éléments relatifs au contrôle qualité en général, et au contrôle visuel en particulier.

Le chapitre 2 décrit la démarche générique que nous proposons pour percevoir, puis évaluer une anomalie. Cette démarche distingue de façon formelle la perception d'une anomalie de son évaluation. Nous montrons que cette distinction apporte une bien meilleure compréhension des sources de variabilité dans le contrôle visuel. En partant des démarches largement utilisées dans le cadre de l'analyse sensorielle, notre démarche formalise donc ces deux étapes afin de réduire la variabilité dans la décision de conformité lors d'un contrôle visuel.

Le chapitre 3 propose une structuration d'une démarche métrologique ayant pour objectif de garantir, la justesse et la faible variabilité dans le temps et dans l'espace. Notre proposition, basée sur les concepts d'une métrologie dimensionnelle, intègre les spécificités liées à toute mesure sensorielle réalisée par l'homme, et en particulier la part de subjectivité importante qui peut être associée à cette mesure.

Partant de l'évaluation d'une seule anomalie, nous décrivons dans le chapitre 4 une démarche permettant de décider de l'acceptation ou du refus d'un produit combinant différentes anomalies sur différentes surfaces. Notre approche, fondée sur la fonction perte de Taguchi, permet de généraliser au contrôle visuel les approches de tolérancement largement utilisées en qualité géométrique des produits.

Le chapitre 5 illustre l'application de ces concepts au sein de l'entreprise avec laquelle nous avons collaboré. Il propose également une synthèse de gains que peut apporter une telle démarche dans une entreprise.

Mots clés : évaluation subjective, analyse sensorielle, contrôle qualité visuel, métrologie sensorielle

Abstract

The thesis, carried out according to a collaboration between the University of Savoy and a great watch-making factory, deals with the problem of visual quality control of high quality manufactured products. We make the hypothesis that the control of this quality will be still realized many years by a visual inspection of the products. Thus, the present work in this thesis proposes the bases of one sensory metrological model formalizing the visual inspection. This work rests on an approach of sensory analysis.

The first chapter presents a bibliographical study of different elements relating to the quality control in general, and particularly, the visual inspection.

The chapter 2 describes the generic approach that we propose to perceive, then evaluate an anomaly. This approach separates in a formal way the perception of an anomaly from its evaluation. We show that this distinction gives a better comprehension of the variability sources in the visual inspection. Based on the approaches very largely used within the framework of the sensory analysis, our approach thus formalizes these two steps in order to reduce the variability in the decision of conformity during a visual inspection.

The chapter 3 proposes a structuring metrological approach having for objective to guarantee the accuracy and the reduced variability in time and space. Our suggestion, based on the concepts of a dimensional metrology, integrates the specificities related to any sensory measurement carried out by the man, and in particular the part of significant subjectivity which can be associated to this measurement.

Based on the evaluation of only one anomaly, we describe in the chapter 4 an approach allowing to decide acceptance or refusal of a product combining various anomalies on various surfaces. Our approach, based on the Taguchi's loss function, makes it possible to generalize with the visual inspection the approaches of tolerance largely used in geometrical quality of the products.

The chapter 5 illustrates the application of these concepts within the company with which we collaborated. It also proposes a synthesis of profits that such an approach can produce in a company.

Key-words : subjective evaluation, sensory analysis, visual quality control, sensory metrology